

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Институт ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ  
Направление подготовки Теплоэнергетика и теплотехника  
Кафедра теоретической и промышленной теплотехники

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

| Тема работы   |
|---|
| <b>Экспериментальное исследование влияния структуры поверхности металлов на статический контактный угол</b> |
| УДК <u>669:532.613-047.37</u>   |

Студент

| Группа      | ФИО                              | Подпись | Дата |
|-------------|----------------------------------|---------|------|
| <b>5Б2Б</b> | <b>Батищева Ксения Артуровна</b> |         |      |

Руководитель

| Должность | ФИО             | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------|-----------------|------------------------|---------|------|
| доцент    | Феоктистов Д.В. | К.Т.Н                  |         |      |

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

| Должность | ФИО         | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------|-------------|------------------------|---------|------|
| Доцент    | Попова С.Н. | К.Э.Н.                 |         |      |

По разделу «Социальная ответственность»

| Должность | ФИО             | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------|-----------------|------------------------|---------|------|
| Доцент    | Дашковский А.Г. | К.Т.Н.                 |         |      |

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

| Зав. кафедрой | ФИО           | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|---------------|---------------|------------------------|---------|------|
| ТПТ           | Кузнецов Г.В. | д.ф.-м.н., профессор   |         |      |

Томск – 2016 г.

**Запланированные результаты обучения выпускника образовательной программы бакалавриата по направлению 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»**

| Код<br>ре-<br>зультата              | Результат обучения<br>(выпускник должен быть готов)  |
|-------------------------------------|--|
| <i>Универсальные компетенции</i>    |  |
| P1                                  | Осуществлять коммуникации в профессиональной среде и в обществе в целом, в том числе <i>на иностранном языке</i> , разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты <i>комплексной</i> инженерной деятельности.  |
| P2                                  | Эффективно работать индивидуально и в коллективе, в том числе междисциплинарном, с делением ответственности и полномочий при решении <i>комплексных</i> инженерных задач.  |
| P3                                  | Демонстрировать <i>личную</i> ответственность, приверженность и следовать профессиональной этике и нормам ведения <i>комплексной</i> инженерной деятельности с соблюдением правовых, социальных, экологических и культурных аспектов.  |
| P4                                  | Анализировать экономические проблемы и общественные процессы, участвовать в общественной жизни с учетом принятых в обществе моральных и правовых норм.   |
| P5                                  | К достижению должного уровня экологической безопасности, энерго- и ресурсосбережения на производстве, безопасности жизнедеятельности и физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.   |
| P6                                  | Осознавать необходимость и демонстрировать <i>способность к самостоятельному обучению в течение всей жизни</i> , непрерывному самосовершенствованию в инженерной профессии, организации обучения и тренинга производственного персонала.   |
| <i>Профессиональные компетенции</i> |  |
| P7                                  | Применять <i>базовые</i> математические, естественнонаучные, социально-экономические знания в профессиональной деятельности <i>в широком</i> (в том числе междисциплинарном) контексте в <i>комплексной</i> инженерной деятельности в производстве тепловой и электрической энергии.   |
| P8                                  | Анализировать научно-техническую информацию, ставить, решать и публиковать результаты решения задач <i>комплексного</i> инженерного анализа с использованием <i>базовых и специальных</i> знаний, нормативной документации, современных аналитических методов, методов математического анализа и моделирования теоретического и экспериментального исследования.   |
| P9                                  | Проводить предварительное технико-экономическое обоснование проектных разработок объектов производства тепловой и электрической энергии, выполнять <i>комплексные</i> инженерные проекты с применением <i>базовых и специальных</i> знаний, <i>современных</i> методов проектирования для достижения <i>оптимальных</i> результатов, соответствующих техническому заданию <i>с учетом</i> нормативных докумен- |

|                                     |  |
|-------------------------------------|--|
|                                     | тов, экономических, экологических, социальных и других ограничений.  |
| P10                                 | Проводить <i>комплексные</i> научные исследования в области производства тепловой и электрической энергии, включая поиск необходимой информации, эксперимент, анализ и интерпретацию данных, и их подготовку для составления обзоров, отчетов и научных публикаций с применением <i>базовых и специальных</i> знаний и <i>современных</i> методов.   |
| P11                                 | Использовать информационные технологии, использовать компьютер как средство работы с информацией и создания новой информации, осознавать опасности и угрозы в развитии современного информационного общества, соблюдать основные требования информационной безопасности.   |
| P12                                 | Выбирать и использовать необходимое оборудование для производства тепловой и электрической энергии, управлять технологическими объектами, использовать инструменты и технологии для ведения комплексной практической инженерной деятельности с учетом экономических, экологических, социальных и других ограничений.   |
| <i>Специальные профессиональные</i> |  |
| P13                                 | Участвовать в выполнении работ по стандартизации и подготовке к сертификации технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов теплоэнергетического производства, контролировать организацию метрологического обеспечения технологических процессов теплоэнергетического производства, составлять документацию по менеджменту качества технологических процессов на производственных участках.                           |
| P14                                 | Организовывать рабочие места, управлять малыми коллективами исполнителей, к разработке оперативных планов работы первичных производственных подразделений, планированию работы персонала и фондов оплаты труда, организовывать обучение и тренинг производственного персонала, анализировать затраты и оценивать результаты деятельности первичных производственных подразделений, контролировать соблюдение технологической дисциплины. |
| P15                                 | Использовать методики испытаний, наладки и ремонта технологического оборудования теплоэнергетического производства в соответствии с профилем работы, планировать и участвовать в проведении плановых испытаний и ремонтов технологического оборудования, монтажных, наладочных и пусковых работ, в том числе, при освоении нового оборудования и (или) технологических процессов.  |
| P16                                 | Организовывать работу персонала по обслуживанию технологического оборудования теплоэнергетического производства, контролировать техническое состояние и оценивать остаточный ресурс оборудования, организовывать профилактические осмотры и текущие ремонты, составлять заявки на оборудование, запасные части, готовить техническую документацию на ремонт, проводить работы по приемке и освоению вводимого оборудования.              |

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ  
Направление подготовки Теплоэнергетика и теплотехника  
Кафедра теоретической и промышленной теплотехники

УТВЕРЖДАЮ:  
Зав. кафедрой ТПТ  
\_\_\_\_\_  
(Подпись) (Дата) Кузнецов Г.В.

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

бакалаврской работы

Студент:

| Группы      | ФИО                              |
|-------------|----------------------------------|
| <b>5Б2Б</b> | <b>Батищева Ксения Артуровна</b> |

Тема работы:

|   |                       |
|---|-----------------------|
| <b>Экспериментальное исследование влияния структуры поверхности металлов на статический контактный угол</b> |                       |
| Утверждена приказом ректора (дата, номер)   | №3777/с от 23.05.2016 |

Срок сдачи студентом выполненной работы:

14.06.2016

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

**Исходные данные к работе**

(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).

Объект исследования – процессы смачивания и растекания капель на структурированных поверхностях.

Предмет исследования – влияние структуры металлов на статический контактный угол.

|  |  |
|--|--|
| <p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p> | <p>Анализ научных публикаций по направлению исследований; разработка методики проведения экспериментальных исследований процесса растекания капли на подложке; определение области варьирования факторов; проведение серии экспериментов на структурированных поверхностях с целью определения статического контактного угла различных жидкостей; анализ экспериментальных данных, определение влияния объема, концентрации, параметров лазера, поверхностного натяжения на статический контактный угол.</p> |
| <p><b>Перечень графического материала</b></p>  |  |
| <p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b></p>   |  |
| <p><b>Раздел</b></p>   | <p><b>Консультант</b></p>  |
| <p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>   | <p>Попова Светлана Николаевна, доцент каф. МЕН</p>   |
| <p>Социальная ответственность</p>  | <p>Дашковский Анатолий Григорьевич, доцент каф. ЭБЖ</p>  |

|  |                   |
|--|-------------------|
| <p><b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b></p> | <p>26.02.2016</p> |
|--|-------------------|

**Задание выдал руководитель:**

| Должность | ФИО             | Ученая степень, звание | Подпись | Дата       |
|-----------|-----------------|------------------------|---------|------------|
| Доцент    | Феоктистов Д.В. | К.Т.Н                  |         | 26.02.2016 |

**Задание принял к исполнению студент:**

| Группа | ФИО                       | Подпись | Дата       |
|--------|---------------------------|---------|------------|
| 5Б2Б   | Батищева Ксения Артуровна |         | 26.02.2016 |

## **Реферат**

Выпускная квалификационная работа 103с. 24рис., 24табл., 48 источников.

Ключевые слова: смачивание, растекание, статический контактный угол, гидрофильность, гидрофобность, микроструктура.

Объектом исследования являются процессы смачивания и растекания капель на структурированных поверхностях.

Цель работы – экспериментально установить влияние структуры поверхности металлов на статический контактный угол.

В процессе исследования проводились эксперименты по определению статического контактного угла жидкостей на поверхностях с различной структурой.

В результате исследования определено влияние структуры, объема, концентрации на статический контактный угол.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: экспериментальная установка, включающая в себя оптическую теневую систему и систему визуализации процесса.

Область применения: энергетика (конструирование высокоинтенсивных теплообменных систем), химическая промышленность (транспортировка, разделение жидкостей), авиация (создание самоочищающихся, не запотевающих, водоотталкивающих поверхностей), машиностроение (разработка тепловых двигателей), медицина (создание противомикробных поверхностей).

## **ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ, НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ**

### **Определения**

В настоящей работе применяются следующие термины с соответствующими определениями:

Краевой угол – это угол образованный поверхностью твердого тела и касательной, проведенной к поверхности капли в точке соприкосновения ее с твердым телом.

Неравновесный краевой угол – это угол, измеренный при отклонении системы от термодинамического равновесия.

Статический неравновесный краевой угол – соответствует постоянной смоченной площади.

Случайная погрешность измерений – составляющая погрешности измерения, изменяющаяся случайным образом в серии повторных измерений одной и той же величины, проведенных в одних и тех же условиях.

Систематическая погрешность измерений – погрешность, изменяющаяся во времени по определённом закону (частным случаем является постоянная погрешность, не изменяющаяся с течением времени).

## Обозначения и сокращения

$\theta$  – Статический контактный угол.

## Нормативные ссылки

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

1. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 «Гигиенические требования к естественно-му, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий».
2. СНиП 23-05-95 «Естественное и искусственное освещение».
3. СанПиН 2.2.4.548–96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений».
4. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы».
5. ГОСТ 12.2.032–78 ССБТ. «Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования».



|   |    |
|---|----|
| Оглавление  |    |
| Введение .....  | 11 |
| 1 Растекание капель жидкостей по структурированным поверхностям ...   | 12 |
| 1.1 Краевой угол .....  | 12 |
| 1.2 Влияние микроструктуры поверхности на статический контактный угол .....   | 15 |
| 1.3 Способы создания гидрофобных и гидрофильных поверхностей ....   | 27 |
| 1.4 Влияние полярной и дисперсионной составляющей на контактный угол .....  | 30 |
| Выводы по первой главе .....  | 32 |
| 2 Физическое моделирование процессов .....  | 37 |
| 2.1 Планирование экспериментальных исследований.....  | 37 |
| 2.1.1 Основные размерные параметры воздействия и выходные переменные планируемого эксперимента .....                                    | 37 |
| 2.1.2 Выбор схемы проведения экспериментальных исследований ....  | 37 |
| 2.1.3 Выбор области изменения основных факторов.....  | 38 |
| 2.2 Описание экспериментальной установки.....   | 43 |
| 2.2.1 Устройство и принцип действия установки.....  | 43 |
| 2.2.2 Способы и средства регистрации, методы и точность измерения основных параметров.....  | 45 |
| 2.2.3 Методика проведения исследования.....   | 46 |
| 2.3 Выводы по второй главе.....   | 51 |
| 3 Анализ результатов экспериментальных исследований процесса растекания капель на структурированных поверхностях металлов.....          | 52 |
| 3.1 Анализ изменения величины статического краевого угла от объема дозируемой жидкости на поверхностях с различной микроструктурой..... | 52 |
| 3.2 Анализ влияния мощности лазерного излучения на статический контактный угол.....   | 55 |

|  |    |
|--|----|
| 3.3 Анализ изменения величины статического контактного угла от времени после лазерной обработки..... | 58 |
| 3.4 Оценка зависимости статического контактного угла от объемной концентрации этанола.....           | 59 |
| 3.5 Оценка погрешностей эксперимента.....  | 62 |
| Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение..                                    | 66 |
| Социальная ответственность.....  | 79 |
| Заключение.....  | 97 |
| Список использованных источников.....  | 98 |

## Введение

Контроль процесса смачивания привлекает внимание исследователей из-за возможности широкого спектра применения: создание самоочищающихся, противомикробных, антикоррозийных, водонепроницаемых материалов, уменьшение сил трения, сопротивления на поверхности. Исследования в этой области, будут интересны предприятиям занимающимся разработкой оборудования для транспортировки, разделения жидкостей, устройств зондирования, антенн, радаров, в космической отрасли, при конструировании спутников.

Структурирование – один из эффективных методов создания материалов с контролируемым процессом растекания жидкости. За последние годы предприняты усилия, направленные на поиск способов по нанесению шероховатости на различные материалы.

Цель работы экспериментально установить влияние структуры поверхности металлов на статический контактный угол.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Анализ научных публикаций по направлению исследований.
2. Разработка методики проведения экспериментальных исследований процесса растекания капли на подложке.
3. Определение области варьирования факторов.
4. Проведение серии экспериментов на структурированных поверхностях с целью определения статического контактного угла различных жидкостей.
5. Экспериментальное определение влияния объема, концентрации, мощности лазерного излучения при формировании структуры поверхности, на статический контактный угол.

Объект исследования – процессы смачивания и растекания капель на структурированных поверхностях.

Предмет исследования – влияние структуры металлов на статический контактный угол.

# 1 Растекание капель жидкостей по структурированным поверхностям

## 1.1 Краевой угол

Краевой угол  $\theta$  – это угол образованный поверхностью твердого тела и касательной, проведенной к поверхности капли в точке соприкосновения ее с твердым телом[1].

Угол определяется уравнением Юнга как соотношение сил молекулярного притяжения между молекулами жидкости и твердого тела и взаимным притяжением молекул жидкости[1]:

$$\cos \theta_0 = \frac{\sigma_{ТГ} - \sigma_{ТЖ}}{\sigma_{ЖГ}}, \quad (1)$$

где  $\theta_0$  – равновесный краевой угол, град.;  $\sigma_{ТГ}, \sigma_{ТЖ}, \sigma_{ЖГ}$  – поверхностные натяжения на границах раздела: твердое тело – газ, твердое тело - жидкость, жидкость – газ, Н/м.

Различают равновесный краевой угол, зависящий только от термодинамических свойств системы (от поверхностных натяжений на границах раздела фаз, участвующих в смачивании) и неравновесный краевой угол, измеренный при отклонении системы от термодинамического равновесия.

Неравновесные краевые углы, изменяющиеся в процессе растекания жидкости по поверхности твердого тела, называются динамическими.

Статический неравновесный краевой угол – соответствует постоянной смоченной площади.

Уравнение равновесного краевого угла можно вывести на основе представлений о работах адгезии и когезии. Работа адгезии характеризует взаимодействие двух конденсированных фаз в расчете на единицу площади контакта, тогда в системе «твердое тело–жидкость–газ» работа адгезии будет равна[1]:

$$W_a = \sigma_{ТГ} + \sigma_{ЖГ} - \sigma_{ТЖ},$$

где  $W_a$  – работа адгезии, Н/м.

Работа когезии характеризует взаимодействие частиц одной фазы. При изотермическом разделении объема жидкости на две части работа разделения на единицу поверхности равна  $2 \cdot \sigma_{жг}$  (коэффициент 2 учитывает образование двух новых поверхностей). Тогда  $W_k = \sigma_{жг} / 2$

Подставив уравнения адгезии и когезии в уравнение равновесного краевого угла (1) получим:

$$\cos \theta_0 = (2 \cdot W_a - W_k) / W_k, \quad (2)$$

Уравнение (2) показывает, что чем меньше работа когезии, тем легче эта жидкость смачивает различные твердые тела.

Существует несколько методов измерения краевого угла смачивания. В метод лежащей капли краевой угол измеряется между твердой поверхностью и жидкостью в точке контакта трех фаз.

В методе пластины Вильгельми поверхность жидкости взаимодействует с пластиной (известных размеров), при этом смачивание происходит вдоль вертикального контура. Стандартная пластина остается своим нижним краем на нулевом уровне (на уровне поверхности жидкости) на протяжении всего измерения. В этом случае нет необходимости вводить поправку на силу веса жидкости под пластиной. Дополнительным преимуществом метода является отсутствие перемешивания фаз, а также при его использовании не требуется знать плотность жидкости.

Поверхностное натяжение рассчитывается на основании измеряемой силы (F), длины смачиваемой поверхности (L) и краевого угла смачивания  $\theta$

$$[1]: \sigma = \frac{F}{L} \cdot \cos \theta.$$

Метод Вашбурна – частный случай динамического метода пластины Вильгельми разработан для характеристики смачиваемости порошков и пучков волокон по степени проникновения жидкости (адсорбции). Метод основан на измерении прироста массы образца во времени. Порошок или волокнистый материал (трава) помещается в стеклянную трубку с фильтром на од-

ном конце. Эта трубка опускается в жидкость (с известным поверхностным натяжением), которая проникает через фильтр и смачивает порошок/волокна.

Метод капиллярного поднятия столба основан на определении высоты столба жидкости в капилляре. Наиболее надежные результаты получаются при условии полного смачивания жидкостью стенок капилляра. При этом поверхность мениска имеет форму полусферы, радиус которой равен радиусу капилляра.

При смачивании реальных тел, величина краевых углов зависит от состава жидкости, условий внешней среды, свойств поверхности [2].

Поверхность реальных твердых тел отличается от идеально гладкой плоскости и покрыта многочисленными неровностями различной формы. Влияние химической неоднородности поверхности на измеряемый краевой угол может быть учтено на основе соотношения Касси [3]:

$$\cos \theta = \sum_i f_i \cos \theta_{i0},$$

где  $f_i$  – доля площадки гладких участков  $i$ -го типа на поверхности изучаемого материала.

Шероховатость твердой поверхности характеризуется ее микрорельефом, который обычно представляет сложное хаотическое чередование разнообразных выступов и впадин. Для характеристики микрорельефа используют коэффициент шероховатости – отношение фактической площади поверхности (с учетом площади впади и выступов) к проекции на горизонтальную плоскость [4].

Шероховатость смачиваемой поверхности в свою очередь вызывает отклонение измеряемого краевого угла от такового на гладкой поверхности [3]. Для расчета макроскопического угла смачивания на шероховатой подложке используют соотношение эмпирически полученное Венцелем [5]:

$$\cos \theta_{\text{ш}} = \frac{S}{S_0} \cos \theta_0 = K \cos \theta_0, \quad (3)$$

где  $K = S/S_0$  – коэффициент шероховатости.

Позднее Дерягин[13] обосновал это соотношение термодинамически и проанализировал пределы его применимости. Показано, что соотношение (3) справедливо при условии одновременной малости высот выступов поверхности и расстояния между ними по сравнению с капиллярной постоянной используемой жидкости и радиусами кривизны жидкого мениска в зоне трехфазного контакта [3].

## 1.2 Влияние микроструктуры поверхности на статический контактный угол

Нанесение на поверхность микроструктуры позволяет управлять процессом смачивания и растекания. Путем изменения параметров лазера (мощности, диаметра лазерного пучка, скорости абляции вещества с поверхности) возможно создание из одного материала образцов с контролируемыми гидрофобными и гидрофильными свойствами.

Исследовались[6] процессы смачивания и растекания на микроструктурированной кремневой поверхности, образованной фемтосекундными лазерными импульсами, и покрытой трихлорфторсиланом. В качестве рабочей жидкости использовались вода и гексадекан. Установлено[6], что такое покрытие понижает поверхностную энергию и позволяет получить супергидрофобные свойства. При смачивании водой необработанной и структурированной кремниевой поверхности контактные углы составили  $115^\circ$  и  $160^\circ$  соответственно. Построены зависимости контактного угла от плотности энергии лазерного излучения (рис. 1.2).

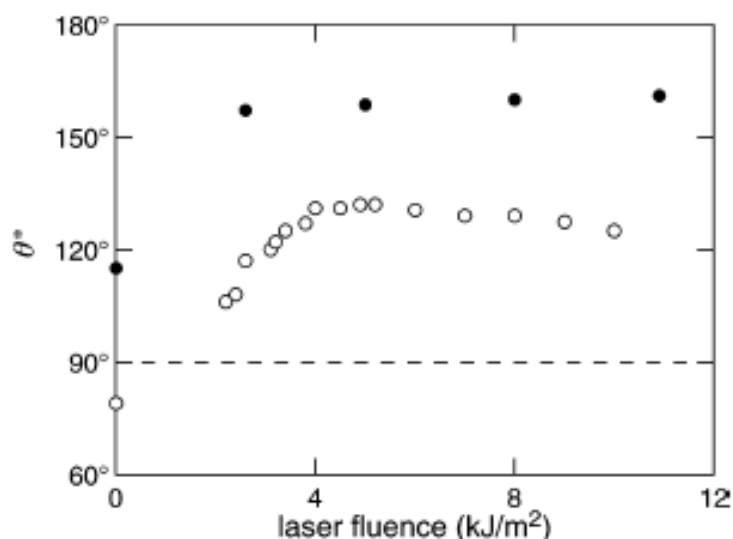


Рисунок 1.2 – Зависимость статического контактного угла капель воды и гексадекана на микроструктурированной кремниевой поверхности от плотности лазерного излучения[6].

Нулевая точка по оси абсцисс соответствует не структурированной поверхности. Установлено, что краевой угол увеличивается на  $40^\circ$  при микроструктурировании с минимальной плотностью энергии  $2,6 \text{ кДж/м}^2$ . Далее он остается постоянным, независимо от плотности энергии лазерного излучения. После того как образец погрузили в воду на неделю, контактный угол остался стабilen. Гексадекан имеет более низкое поверхностное натяжение, чем вода ( $\text{H}_2\text{O}$ )  $72,0 \text{ мН/м}$ ; (гексадекан)  $26,7 \text{ мН/м}$ ), имеет меньшие контактные углы. Определено, что контактный угол гексадекана на необработанной поверхности равен  $79^\circ$ , на микроструктурированной, угол смачивания увеличивается и составляет от  $105$  до  $129^\circ$ , в зависимости от скорости абляции.

Экспериментально исследовались [7] процессы смачивания и растекания капель воды объемом  $4 \text{ мкл}$  на кремниевой поверхности, легированной фосфором при одновременном нанесении микро- и нано- структуры лазером. Образцы с различным значением контактного угла получены изменением диапазона плотности энергии (от  $0,33$  до  $1,0 \text{ Дж/см}^2$ ). С помощью лазерной обработки улучшены гидрофобные свойства. Контактный угол увеличен с  $66$  до  $130$  градусов. Изменение статического контактного угла объясняется тем,



что между жидкостью и поверхностью кремния из-за нанесенной микро-структуры остаются воздушные пространства.

Исследовался [8] процесс получения супергидрофобных свойств на поверхности из нержавеющей стали (AISI 316L) микроstructuring лазером. Для нанесения использована регенеративная многопроходная титан/сапфировая лазерная система, с длиной волны 800 нм, частотой повторения 1 кГц. Энергия импульса до 1 мДж. Лазерный луч фокусировался до диаметра около 180 мкм перпендикулярно к поверхности образцов. Микро-структура образцов сканирована электронным микроскопом (SEM). Перед измерением образцы покрыты силаном для снижения поверхностной энергии. В качестве рабочей жидкости выбрана вода  $V = 1$  мл. Статический контактный угол измерялся гониометром. Построена зависимость статического контактного угла от плотности энергии лазерного излучения (рис 1.3).

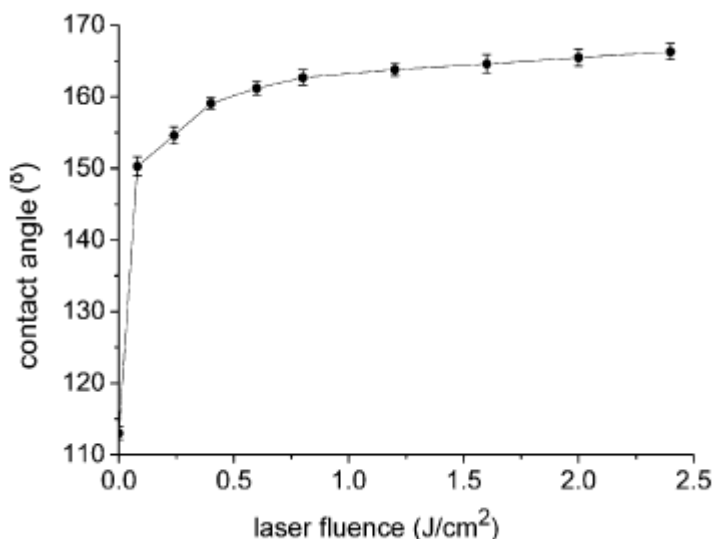


Рисунок 1.3 – Зависимость статического контактного угла капель воды на микро-структурированной стальной поверхности от плотности лазерного излучения[8].

На оси абсцисс за начальную точку принята нулевая плотность энергии. Контактный угол соответствует необработанному образцу. Значениям плотности энергии 0,08 Дж/см², 0,8 Дж/см² и 2,4 Дж/см² соответствуют углы: 150,3±1,38°, 162,7± 1,18° и 166,3± 1,18° соответственно.

В работе [9] исследовался процесс изменения гидрофобных и гидрофильных свойств полимерных поверхностей, нанесением микроструктуры лазером. Полимер PODR1 растворяли в хлороформе. Литьем на стеклянную подложку получены образцы толщиной 2 мкм. Микроструктура нанесена лазером, работающим с частотой повторения 850 Гц, длиной волны 532 нм. Энергия импульсов варьировалась от 17 нДж до 65 нДж. Образцы анализированы с помощью оптической и атомно-силовой микроскопии. Для улучшения гидрофобных свойств поверхность обработана трихлорсиланом. Шероховатость поверхности изменялась от  $R_a = 100$  нм без нанесения микроструктуры, до  $R_a = 450$  нм после нанесения. В качестве рабочей жидкости использовалась вода объемом 3 мкл. Статический контактный угол измерен гониометром, при комнатной температуре ( $22^{\circ}\text{C}$ ) и относительной влажности воздуха от 40 до 50%. Построена зависимость статического контактного угла от параметра  $f$ , который равен отношению площади смоченной поверхности к площади нанесенной ячейки (рис. 1.4). Контактный угол уменьшается с увеличением параметра  $f$ .

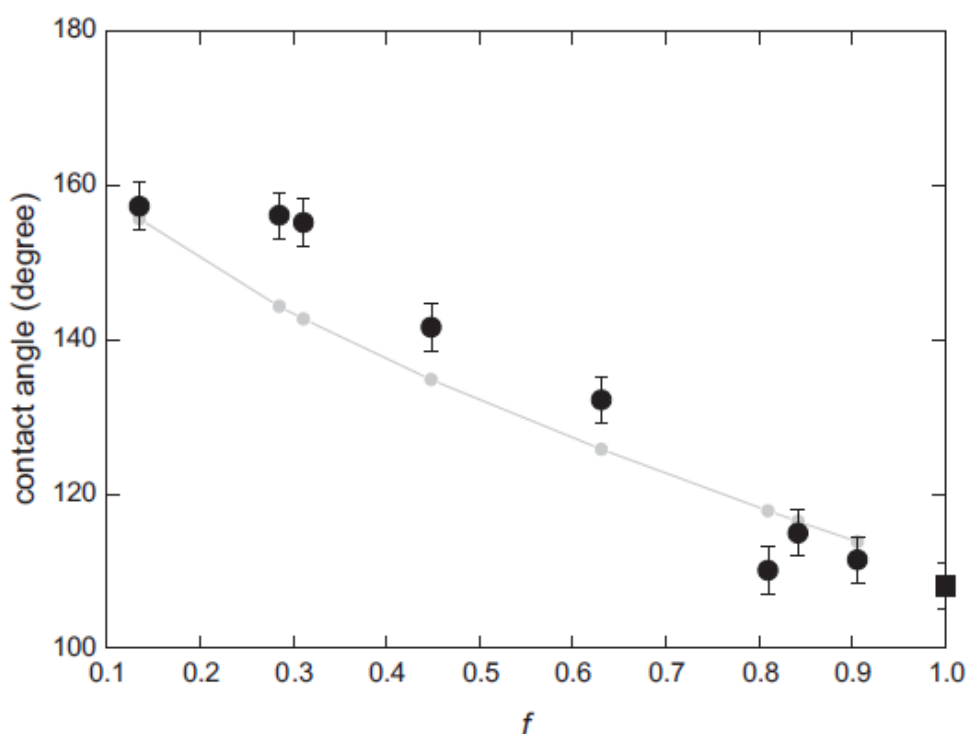


Рисунок 1.4 – Зависимость статического контактного угла капель воды на микроструктурированной полимерной поверхности от параметра  $f$  [9].

Значение контактного угла на поверхности необработанной поверхности 108 градусов. На микроструктурированных образцах максимальное значение контактного угла  $157 \pm 3$  градуса.

Авторы (ChangshengDonga, YuGua, MinlinZhong, LinLi, KursadSezer, MingxingMa, WenjinLiu) исследовали [10] процесс создания гидрофобной медной поверхности, совместным нанесением микроструктуры наносекундным импульсным лазером и химического травления (погружали в 0,5М HCl в течение 7 дней). В качестве поверхности выбран сплав CuMn. После нанесения текстуры, в результате травления марганец реагирует с HCl, в итоге полностью удаляется из сплава и остается нанопористая медь. Для получения супергидрофобных свойств, образцы замачивались в додекан-1-тиоле, для уменьшения поверхностной энергии. В работе использовалась вода, объемом 1 мкл. Получены зависимости статического контактного угла от шероховатости поверхности (рис 1.5).

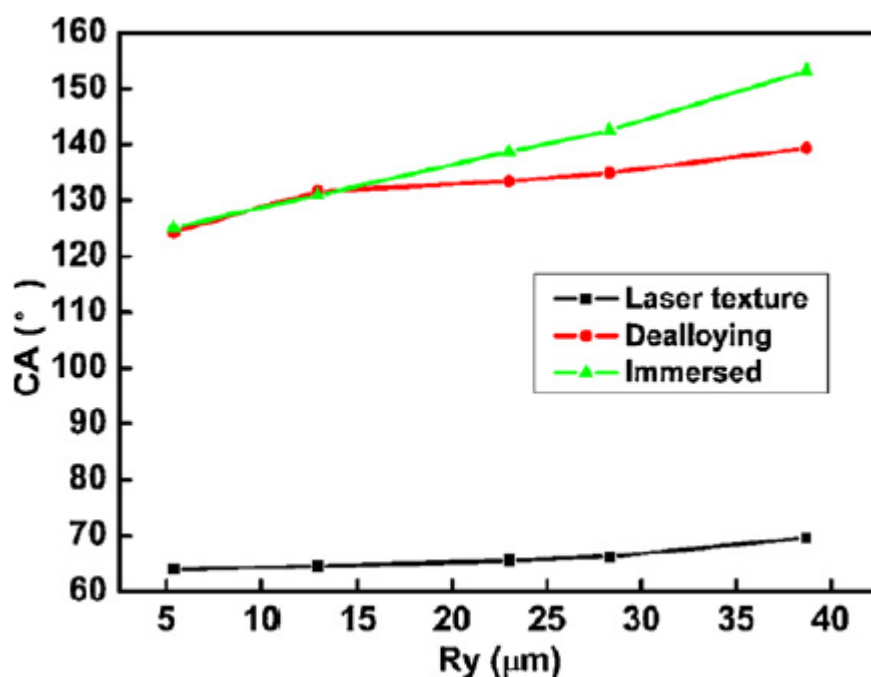


Рисунок 1.5 – Зависимость статического контактного угла капель воды от шероховатости (параметра Ry)[10].

Установлено, что контактный угол на полированной гладкой поверхности равен 64 градуса. Последнее означает, что поверхность образцов обладает гидрофильными свойствами. После лазерного текстурирования, величина контактного угла увеличилась до 77 градуса. Это свидетельствует о том, что микроструктура может повысить шероховатость поверхности, но имеет незначительное влияние на смачиваемость при данном условии лазерного текстурирования. Этот способ не изменил свойства от гидрофильных к гидрофобным. После травления контактный угол вырос до 140 градусов. Для того, чтобы получить супергидрофобную медную поверхность, образцы замачивались в додекан-1-тиоле, после чего контактный угол составил 153 градуса.

Исследовался [11] процесс изменения величины статического контактного угла капель деионизированной воды, объемом 3 мкл, на нержавеющей стали (AISI 316L SS). Поверхность микроструктурирована лазерным излучением. Варьирование глубины впадин достигалось изменением скорости абляции. После проведения серии экспериментов, сталь с нанесенной шероховатостью покрыта силаном. После чего проведены аналогичные исследования. Поверхности со скоростью абляции 240 мм/с были супергидрофильными ( $\theta = 0$  градусов). При  $V = 480$  мм·с<sup>-1</sup>, капли воды образуют овальную форму и имеют два угла контакта,  $\theta = 54.8$  градуса и  $\phi = 79.3$  градуса. При  $V > 600$  мм/с, поверхности стали гидрофобными ( $\theta > 90$  градусов). Максимальный угол контакта для диапазона скоростей -  $\theta \sim 113$  градуса. После покрытия силаном, из-за супергидрофобных свойств поверхности, объем капель был увеличен до 9,7 мкл статический контактный угол лежал в диапазоне 150 градусов.

Авторами (C.Hairaye, F.Mermet, T. Engel, P. C. Montgomery, J. Fontaine) исследовался [12] процесс изменения свойств нержавеющей стали AISI 316L при нанесение микро- и нано- структуры. Механическая полировка не производилась, первоначальная шероховатость образца Ra 69 нм. Для нанесения структуры, использовали сверхбыструю импульсно-волоконную

лазерную систему Tangerine (AmplitudeSystèmes, Франция), с центральной длиной волны 1030 нм, длительностей импульсов 300 фемтосекунд, энергия импульса 100 мкДж при частоте повторения 200 кГц. Поверхность исследована на профилометре InfiniteFocus 3D (Alicona визуализации GmbH, Австрия), микроскопе Leitz-Линник, атомно-силовом микроскопе ХЕ-70 (Корея). Смачиваемость плоских и текстурированных образцов определяли программой «The drop shape analyser DSA25» компании Krüss. В качестве рабочей жидкости использована вода объемом 5 мкл. Сделаны выводы о том, что структура может быть использована для изменения цвета поверхности, путем дифракции белого цвета. Измерены контактные углы: на не текстурированном образце ( $R_a \approx 69 \text{ нм}$ ), угол контакта  $75^\circ$  – поверхность гидрофильная, при нанесении «мелкой ряби» (шероховатость  $R_a \approx 75 \text{ нм}$ ), контактный угол уменьшился до  $55^\circ$  - шероховатость увеличивает гидрофильную природу поверхности. В случае нанесения на поверхность «грубой ряби», капля полностью поглощается структурой, угол контакта измерить не удалось. Поверхность, на которую нанесена абляцированная микроструктура, имеет угол  $92^\circ$ .

Работа [13] посвящена исследованию процесса создания гидрофобных поверхностей на алюминиевых листах лазерной обработкой. Построена зависимость статического контактного угла от мощности лазера (рис 1.6).

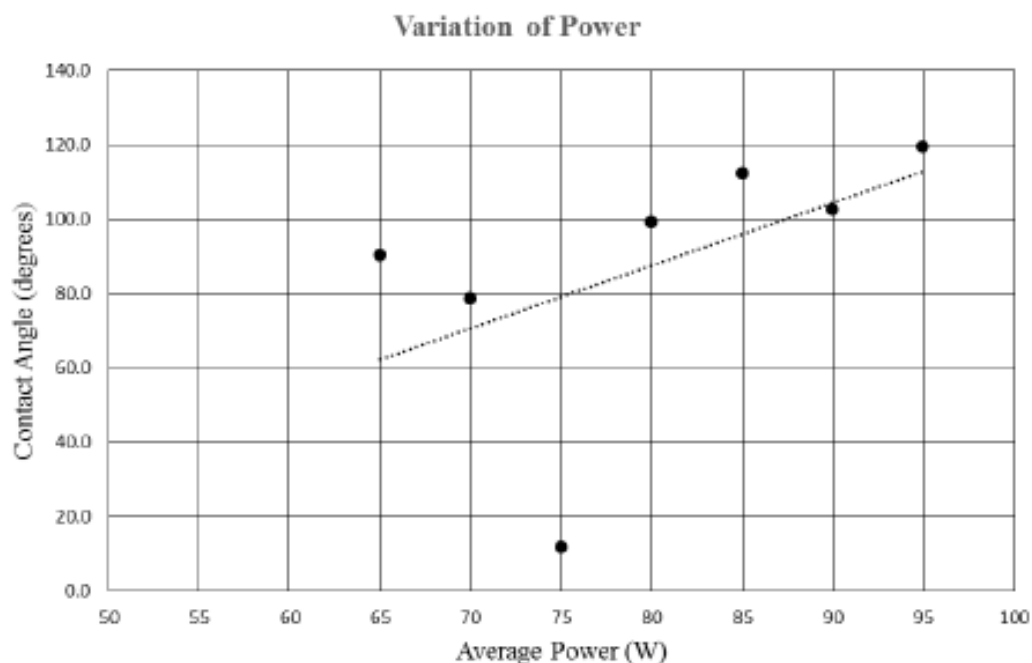


Рисунок 1.6 – Зависимость статического контактного угла капле воды от мощности лазерного излучения[13].

В качестве рабочей жидкости использовалась вода. Поверхности, обработанные лазером с длиной волны 1064 нм приобрели гидрофильные и супергидрофильные свойства. Поверхности, обработанные импульсным волоконным лазером мощностью 20Вт, получили супергидрофобные свойства. Контактный угол составил до 160°. Гидрофобные образцы, с контактными углами до 134 ° получены при помощи DPSS лазера, работающего на средней мощности до 220 Вт. Контактные углы измерялись при помощи гониометра.

Исследовался [14] процесс получения супергидрофобных поверхностей, нанесением микроструктуры инфракрасным лазером. В качестве материала использована медь (чистота 99,9%) и латунь (RS компоненты, CZ121M, 58% Cu, 39% Zn, 3% Pb) толщиной 0,45 и 0,6 мм соответственно. Микроструктура нанесена волоконной лазерной системой SPI (20 Вт EP-S), с параметрами: длина волны 1064 нм, ширина импульса  $\sim 220$  нс, частота 25 кГц. Плотность энергии для медных образцов 75, 84, 93 Дж/см<sup>2</sup>, для латуни 55, 65, 75 Дж/см<sup>2</sup>. В качестве рабочей жидкости использована деионизованная вода объемом 5 мкл. В эксперименте использована теневая система. Кап-

ля жидкости выдавливалась на поверхность при помощи шприцевого дозатора, изображение захватывалось камерой (Unibrain 1394) в сочетании с системой увеличения в 12 раз. Контактный угол по изображению капли определяли с использованием программного обеспечения FTA32 (версия 2.0). Получены зависимости статического контактного угла от времени после нанесения микроструктуры (рис. 1.7).

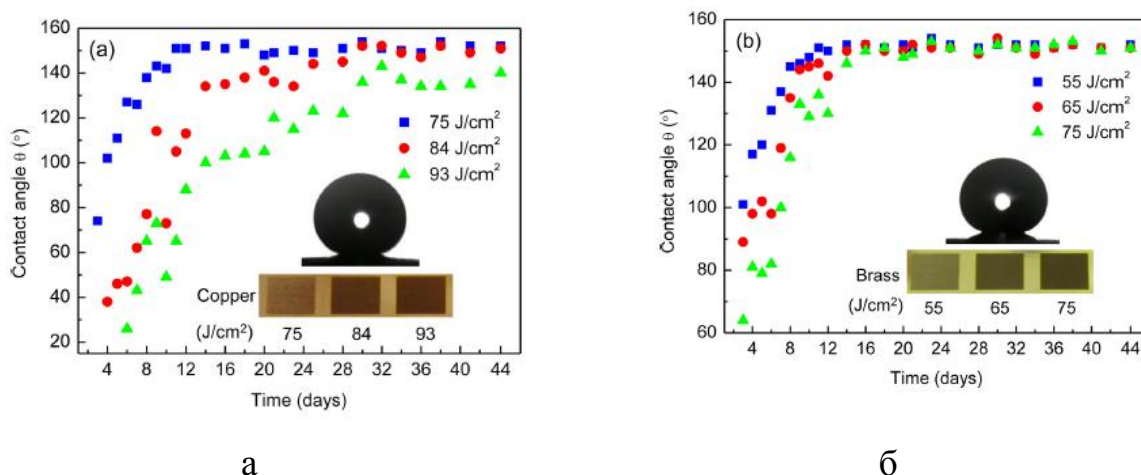


Рисунок 1.7 – Зависимость статического контактного угла от времени после нанесения микроструктуры на а) меди, б) латуни [14].

Установлено, что после изготовления поверхности становятся гидрофильными. С течением первых десяти дней контактный угол увеличивается, далее его рост замедляется. На латуни, спустя 11 дней краевой угол достигает стабильного состояния. На меди стационарное состояние достигается спустя 30 дней. Контактный угол составляет 152 градуса. В течении всего времени контактный угол увеличивается экспоненциально, свойства поверхностей переходят из гидрофильных в супергидрофобные. Смачиваемость текстурированных поверхностей изменяется под воздействием окружающей среды и объясняется раскислением поверхности металлов.

Авторы (YuanLi, YanlingTian, ChengjuanYang, DaweiZhang) исследовали [15] процесс создания гидрофобной поверхности Ti-6Al-4V, при помощи наносекундного лазерного излучения. Состав сплава Ti-6Al-4V: Ti 88.1-

90,4 мас%, Al 5.5-6.8 мас%, V 3,5-4,5 мас%, C <0,1 мас%, H<0,015% вес, Fe<0,3 мас%, N <0,05 мас% и O<0,13% мас. Структура наносилась наносекундной лазерной системой (InnoLasLaserGmbH, Германия), с параметрами: длина волны 1064 нм, средняя мощность 150 мВ, частота 100Гц, скорость сканирования 0, 5мм / с. Анализ поверхности проведен на электронном микроскопе S-3000N (Япония). Шероховатость поверхности измерена на профилометре TaylorHobson (Англия). Для количественного измерения химического состава поверхности использован рентгеновский фотоэлектронный спектроскоп (РФЭС), PHI 5600. В качестве жидкости использовалась дистиллированная вода, объемом 3 мкл. Получены три типа микроструктур. Первоначально, облученные образцы показали гидрофильные свойства, однако, с течением времени, эти поверхности стали гидрофобными с углом контакта выше 90 °. Максимальный контактный угол может достигать 137 °. Построены зависимости статического контактного угла от времени после нанесения микроструктуры (рис. 1.8).

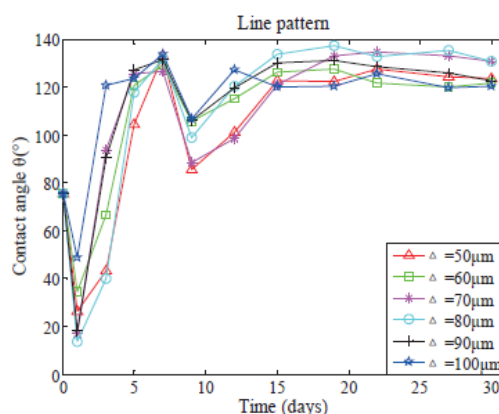


Рисунок 1.8 – Зависимость статического контактного угла от времени после нанесения микроструктуры [15].



Установлено что с течением времени поверхность металла меняет химический состав, повышается содержание углерода.

В работе [16] исследовался процесс создания супергидрофобной поверхности на графеновых пленках, нанесением микроструктуры фемтосекундным лазером в виде цветов розы. Графеновые пленки состоят слоев графеновых наноллистов разделенных нанометрическими зазорами ( $\sim 10\text{-}50$  нм) и графеновых монослоев с расстоянием между прослойками  $\sim 0,37$  нм. Эта иерархическая структура пленок позволяет генерировать растягивающее напряжение во время фемтосекундной лазерной абляции, что способствует образованию текстуры в виде цветов. Необработанная графеновая пленка проявляет гидрофильность, контактный угол  $78^\circ$ , после нанесения микроструктуры поверхность проявляет супергидрофобные свойства, контактный угол  $150^\circ$ . Исследован химический состав поверхности. Содержание кислорода гладкой поверхности  $29,03\%$ , структурированных поверхностей  $12,39\%$  и  $6,76\%$ , соответственно. Результаты химического анализа показали, что количество кислородных групп уменьшается при лазерной абляции. Также содержание кислорода уменьшается с увеличением плотности цветка. Дальнейшее удаление гидрофильных групп кислорода лазерной абляцией может играть важную роль в увеличении гидрофобности микроструктурированных графеновых пленок.

Авторы (VanDuongTa, AndrewDunn, ThomasJ.Wasley, JiLi, Robert W.Kay,JonathanStringer, Patrick J. Smith, EmreEsenturk, ColmConnaughton, Jonathan D. Shephard) исследовали [17] процесс получения супергидрофобной поверхности при помощи обработки лазером поверхности из нержавеющей стали 304S15, толщиной 1 мм. Микроструктура нанесена волоконным SPI лазером (20 Вт EP-S) с длиной волны 1064 нм, частотой повторения 25 кГц. Морфология поверхности исследована с помощью сканирующего электронного микроскопа (SEM), модель ФЭИ QuantaFEG650 и оптическим микроскопом (Leica DM6000M). В качестве жидкости использовалась суспензия полистирола. Вещество получено путем разбавления 2% сухого вещества

монодисперсной водной суспензии (размер частиц 0,5 мкм) с деионизированной водой. В эксперименте использована теневая система. Капля жидкости выдавливалась на поверхность при помощи шприцевого дозатора, изображение захватывалось камерой (Unibrain 1394) в сочетании с системой увеличения в 12 раз. Контактный угол по изображению капли определяли с использованием программного обеспечения FTA32 (версия 2.0). Построена зависимость статического контактного угла от плотности энергии лазерного излучения (рис 1.9).

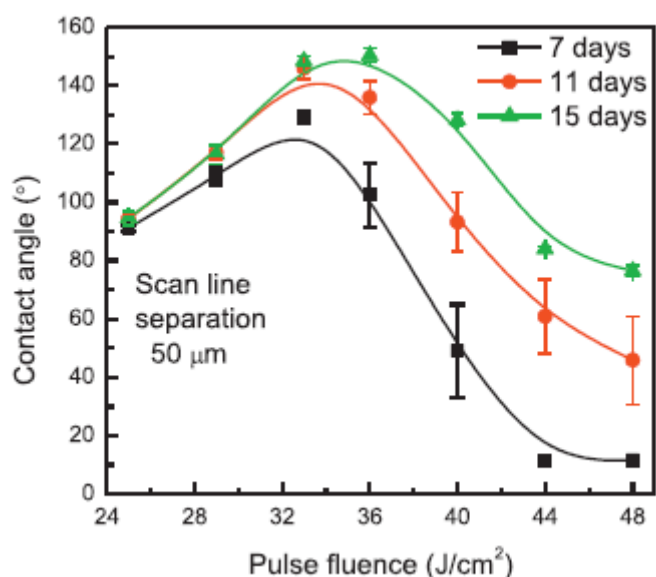


Рисунок 1.9 – Зависимость статического контактного угла капель воды на микроструктурированной стальной поверхности от плотности лазерного излучения[17].

Мощность лазера и структура оказывают непосредственное воздействие на свойства поверхностей. При увеличении мощности лазера, угол контакта возрастает до максимального значения и затем пропорционально уменьшается. Построены зависимости статического контактного угла от времени после нанесения микроструктуры (рис. 1.10).

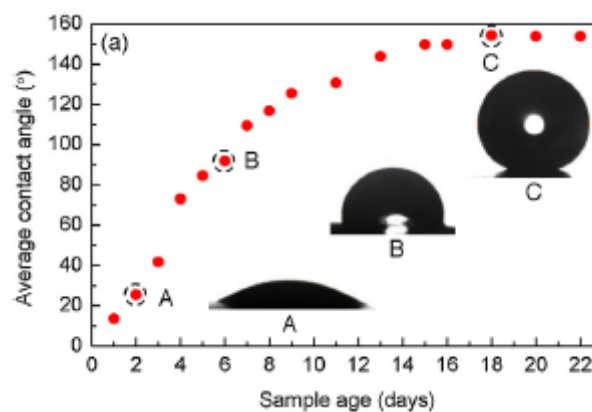


Рисунок 1.10 – Зависимость статического контактного угла от времени после нанесения микроструктуры[17].

Углы измерены через 7, 11 и 15 дней после нанесения микроструктуры. Установлено, что величина контактного угла увеличивается с течением времени.

Исследовался [18] процесс создания гидрофобной поверхности металла. В качестве материала выбран титан. На поверхность нанесена микроструктура наносекундной лазерной системой (InnoLasLaserGmbH, Германия), параметрами: длина волны 1064 нм, длительность импульса 6 нс, выходная мощность 1,2 Вт, частота 100 Гц. Диаметр сфокусированного лазерного луча составляет 100 мкм. Плотность энергии лазерного излучения  $1,5279 \times 10^2$  Дж/см<sup>2</sup>. На поверхность нанесены три микроструктуры: линии, сетка и точечный узор. Для каждого вида микроструктур, промежутки между линиями или пятнами составили 50, 60, 70, 80, 90 и 100 мкм, соответственно. В качестве жидкости используется вода объемом 3 мкл. Получены значения статических контактных углов. До нанесения текстуры, отполированный титан был гидрофильным, имел угол контакта 77,8°. Построены зависимости статического контактного угла от времени после нанесения микроструктуры (рис. 1.11).

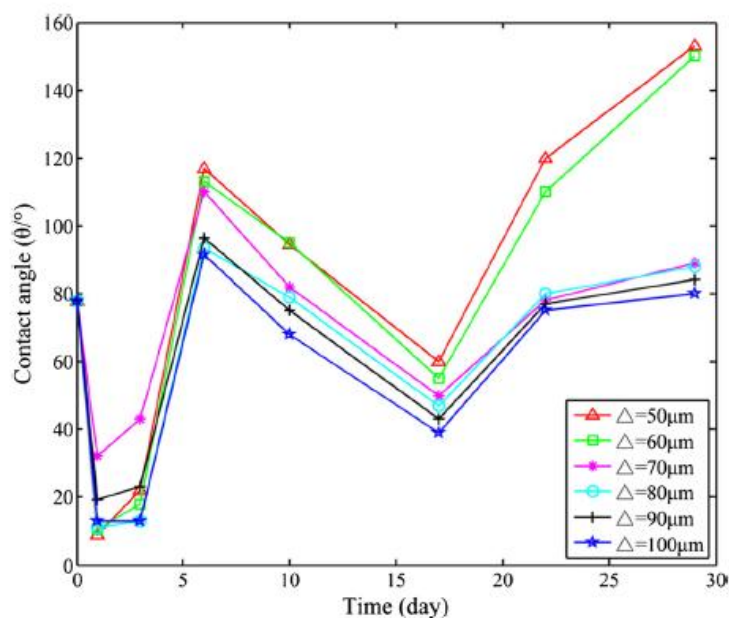


Рисунок 1.11 – Зависимость статического контактного угла от времени после нанесения микроструктуры [18].

После лазерной обработки, углы значительно уменьшились, т.е. гидрофильные свойства увеличились. Минимальный контактный угол был менее 20 градусов. С течением времени свойства поверхности изменились. Контактные углы достигли значения более 100 градусов, максимальный угол контакта составил около 150 градусов. Выявлено, что не на всех поверхностях контактный угол последовательно возрастает. За период, все кривые показали некоторые колебания. Это явление, объясняется химической реакцией между материалом образца и воздуха или из-за влияния окружающей среды.

### 1.3 Способы создания гидрофобных и гидрофильных поверхностей

В настоящий момент ведутся поиски способов создания поверхностей с контролируемыми свойствами. При выборе метода, решающими факторами является экономичность установки, простота использования, возможность получения образцов с различной структурой, шероховатостью. Известны следующие способы создания микроструктуры:

#### 1 Химическое осаждение из газовой фазы и сублимация

Метод получения массивов нанотрубок или наностержней с помощью осаждения их из газовой фазы (chemical vapor deposition, CVD) [19]. Можно получить упорядоченные массивы углеродных нанотрубок одинакового диаметра – структурная матрица имитирующая поверхность листа лотоса. Для придания такой поверхности супергидрофобного характера необходимо дополнительная химическая модификация поверхности. Кроме углеродных нанотрубок, метод позволяет получать поверхности на основе мягких пленок кремнеорганики без необходимости дальнейшей гидрофобизации [20].

Родственным методом, основанном на осаждении вещества из газовой фазы, является сублимация [21], однако в отличие от CVD, после сублимации образуются совершенно неупорядоченные шероховатые поверхности, образующие пористую структуру.

## 2 Электрохимические методы

Метод используется для осаждения кластеров металлов или оксидов металлов. Шероховатость получаемой поверхности зависит от времени осаждения и прикладываемого напряжения. В работе [22] супергидрофобная поверхность получена электрохимическим осаждением кластеров золота на многослойной полиэлектролитной матрице.

Используются другие электрохимические методы: электрохимическая полимеризация [23], реакции в гальванических ячейках [24] и др.

## 3 Методы, основанные на использовании золь-гель материалов

Для получения пористых структур с большим значением коэффициента шероховатости используются золь-гель материалы на основе алколюатов металлов [25]. Управление процессами гидролиза и конденсации при образовании золя позволяет контролировать процесс получения пен, и следовательно, шероховатость получаемых поверхностей.

## 4 Темплатные методы

Используются мембраны с упорядоченной системой одномерных пор различного диаметра. Такой матрицей является анодный оксид алюминия [26]. В качестве прекурсоров, которые кристаллизуются в виде нановолокон

внутри таких пор, используются полимеры, например, поливинилацетат или полиакрилонитрил. Основной недостаток метода - ограничение максимального диаметра пор.

#### 5 Химическая модификация поверхности

Как правило, структурирование поверхности без дальнейшей обработки не являются гидрофобными, т.к. материал, из которых они состоят - гидрофильный. Исходя из законов Венцеля и Касси, дополнительное структурирование поверхности усилит их гидрофильные свойства. В зависимости от материала, из которого состоит структурированная поверхность, существует несколько вариантов гидрофобизации. Нанесение дополнительного гидрофобного слоя может происходить с помощью химической модификации поверхности необходимыми молекулами через газовую фазу, в растворе или за счет физической адсорбции [27]. В зависимости от материала, для гидрофобизации поверхности используются гидрофобные производные алкантиолов [28], силанов [29], жирных кислот [30] и др.

#### 6 Реактивное ионное травление

Основан на использовании реактивной плазмы, вытравливающей материал, незащищенный химически. Часть, поверхности, которую не надо травить, защищают химически с помощью покрытий. Плазма образуется в вакууме под воздействием электромагнитного поля. Тип и количество используемого газа зависит от материала, который необходимо травить. Например, для кремниевых поверхностей обычно используется плазма на основе гексафторида серы.

#### 7 Двойное текстурирование

Основан на получении супергидрофобных поверхностей, совмещающих две текстуры — в микро- и наномасштабах. Поверхности позволяют увеличить краевой угол смачивания, уменьшить гистерезис краевого угла, а также повысить устойчивость состояния Касси. Микротекстура определяет функциональные свойства поверхности, например, длину скольжения. Нанотекстура используется для улучшения смачивания поверхностей. [31].

## 8 Литографические методы

Основаны на использовании шаблонов, т.е. топология поверхности заранее задана - шаблонной формой, заложенной в управляющую программу: при травлении электронным пучком; маской, напечатанной заранее для фотолитографии; твердым шаблоном, форма которого копируется на другой материал с помощью печати и др.

## 9 Фемтосекндное лазерное облучение

Основан на изменении морфологии поверхности, воздействием импульсного лазерного излучения. Путем изменения параметров прибора (плотность энергии, частота, диаметр пучка и др.) позволяет получать текстуры с различной морфологией [32].

### 1.4 Влияние полярной и дисперсионной составляющей на контактный угол

Известно [33], что поведение капли жидкости на поверхности твердого тела зависит от поверхностных свойств, таких, как поверхностное и межфазное натяжение, свободная энергия поверхности (СЭП).

На величину статического контактного угла влияет свободная энергия поверхности. Для твердых материалов ее нельзя измерить непосредственно. Свободная поверхностная энергия может быть найдена на основе краевого угла смачивания поверхности различными жидкостями. Основная задача при анализе свободной энергии поверхности - правильно подобрать тестовые жидкости и метод расчета, чтобы получить максимально достоверные результаты[33].

Свободная поверхностная энергия может быть представлена как сумма дисперсионной  $\sigma^D$  и полярной  $\sigma^P$  составляющих[ 33]:

$$\sigma = \sigma^D + \sigma^P.$$

Зависимость поверхностного натяжения некоторых жидкостей от их химической природы представлены в таблице 1.1. Большинство жидкостей с ковалентным типом связи в молекулах имеют  $\sigma_{ж}^D \sim (20 \div 30) \text{мДж/м}^2$ , поэтому

величину  $\sigma_{\text{ж}}$  определяют не скомпенсированные на границе раздела полярные взаимодействия.

Таблица 1.1. Поверхностное натяжение  $\sigma_{\text{ж}}$  (мДж/м<sup>2</sup>) различных жидкостей при 20°C;  $\sigma_{\text{ж}}^{\text{D}}$  и  $\sigma_{\text{ж}}^{\text{P}}$  – компоненты  $\sigma_{\text{ж}}$ , обусловленные дисперсионными и полярными межмолекулярными взаимодействиями в объеме жидких фаз [33].

| Жидкость   | $\sigma_{\text{ж}}$ | $\sigma_{\text{ж}}^{\text{D}}$ | $\sigma_{\text{ж}}^{\text{P}}$ |
|------------|---------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Вода       | 72,6                | 21,8                           | 50,8                           |
| Этанол     | 21,4                | 2,6                            | 18,8                           |
| Декан      | 23,8                | 23,8                           | 0                              |
| Дийодметан | 50,8                | 50,8                           | 0                              |
| Хлороформ  | 27,2                | 0                              | 0                              |

Для полярных поверхностей применяются полярные жидкости и теории, основанные на взаимодействии активных центров (молекул) поверхности с газовой или жидкой фазой. Специалисты фирмы KRUSS обнаружили, что для измерения СЭП в качестве жидкости хорошо подходят водные растворы спирта, т.к. полярность раствора меняется при изменении соотношения вода:спирт [33].

Существует несколько методов для расчета свободной энергии поверхности (метод Зисмана, метод Оунса, Вендта, Рабеля и Кьельбле, метод Ву, метод Шульца, метод Оусса и Гуда).

Поверхность металлов – имеет дисперсную и полярную составляющую. Для определения СЭП наиболее подходящим является метод Фоукса, в котором составляется система из двух уравнений.

В первом этапе находится дисперсная составляющая свободной энергии поверхности (СЭП) с помощью неполярной жидкости (таб. 1).

$$\cos\theta = 2\sqrt{\sigma_{\text{т}}^{\text{D}}}\sqrt{\frac{1}{\sigma_{\text{ж}}^{\text{D}}}}.$$

На втором этапе уравнение решают относительно полярной жидкости (как правило, воды), для которой известны полярная и дисперсионная составляющие.



$$\frac{\sigma_{\text{ж}} \cdot (\cos\theta + 1)}{2\sqrt{\sigma_{\text{ж}}^{\text{D}}}} = \frac{\sqrt{\sigma_{\text{Т}}^{\text{P}}} \cdot \sqrt{\sigma_{\text{ж}}^{\text{P}}}}{2\sqrt{\sigma_{\text{ж}}^{\text{D}}}} + \sqrt{\sigma_{\text{Т}}^{\text{D}}}.$$

Дисперсные и полярные составляющие зависят не только от материала, но и от морфологии поверхности, на которую существенно оказывает влияние метод изготовления, шероховатость, структура поверхности, способ их нанесения[33].

#### Выводы по первой главе

Проведен анализ научных публикаций, направленных на исследование влияния текстуры поверхности на изменение статического контактного угла (таб.1.2). Установлено, что отсутствуют исследования зависимости объема жидкости на статический контактный угол на микроструктурированных поверхностях.

Сделан вывод о том, что метод нанесения микроструктуры лазерным излучением имеет достоинства: это бесконтактный, не требующий серьезных капиталовложений метод, который легко использовать, можно получить широкий диапазон текстур (ограничен только параметрами лазерной установки). По сравнению с литографическими методами, не нужна начальная матрица, можно получать текстуры на разных материалах.

Для изучения поверхностных свойств твердого тела и жидкостей выбран метод Фоукса.

Установлено, что для изучения зависимости контактного угла от величины полярной и дисперсной составляющей наиболее подходят спирты. Из-за возможности варьирования концентрации их водного раствора.

При изучении механизма взаимодействия капель жидкости с твердой поверхностью перспективным направлением является исследование происходящих процессов с использованием оптической теневой системы на основе высокоскоростной видеосъемки.

Таблица 1.2. Влияние микроструктуры поверхности на контактный угол

| Ис-точник | Материал подложки  | Исследуемая жидкость, объем | Основные выводы и зависимости  |
|-----------|--|-----------------------------|--|
| [6]       | Кремний  | Вода,<br>Гексодекан         | Зависимость контактного угла от плотности энергии лазерного излучения.<br>Вода: контактный угол на гладкой поверхности $115^\circ$ , на микроструктурированной $160^\circ$ .<br>Гексодекан: контактный угол на гладкой поверхности $79^\circ$ , на микроструктурированной от $105^\circ$ до $129^\circ$ , в зависимости от скорости абляции. |
| [7]       | Кремний, легированный фосфором   | Вода                        | Контактный угол увеличен с $66$ до $130$ градусов. Жидкость проникает в микроструктуру кремния частично, оставляя воздушные пространства.  |
|           |  | 4 мкл                       |  |
| [8]       | Нержавеющая сталь (AISI 316L)  | Вода                        | Зависимость статического контактного угла от плотности энергии лазерного излучения. Значениям плотности энергии $0,08 \text{ Дж/см}^2$ , $0,8 \text{ Дж/см}^2$ и $2,4 \text{ Дж/см}^2$ соответствуют углы: $150,3 \pm 1,38^\circ\text{C}$ , $162,7 \pm 1,18^\circ\text{C}$ и $166,3 \pm 1,18^\circ\text{C}$ соответственно.                  |
|           |  | 1 мкл                       |  |
| [9]       | Полимер, нанесенный на стеклянную подложку                               | Вода                        | Построена зависимость статического контактного угла от параметра $f$ , который равен отношению площади смоченной поверхности к площади одной ячейки. Контактный угол уменьшается с увеличением параметра $f$ .<br>Контактный угол на гладкой поверхности $108$ градусов. На микроструктурированной максимальное значение $157$ градусов.     |
|           |  | 3 мкл                       |  |
| [10]      | Нанопористая медь, полученная структурированием и травлении сплава CuMn. | Вода                        | Зависимость статического контактного угла от шероховатости поверхности. Контактный угол на отполированной гладкой поверхности $64$ градуса. После лазерного текстурирования $77$ градусов. После травления $140$ градусов. После замачивания в додекан-1-оле $153$ градуса.  |
|           |  | 1 мкл                       |  |

|      |                                  |                       |   |
|------|----------------------------------|-----------------------|---|
| [11] | Нержавеющая сталь (AISI 316LSS). | деионизированная вода | При скорости абляции $V=240$ м/с поверхность супергидрофильная ( $\theta = 0$ градусов). $V = 480$ мм $\cdot$ с <sup>-1</sup> , капли воды образуют овальную форму и имеют два угла контакта, $\theta = 54.8$ градуса и $q = 79.3$ градуса. $V>600$ мм/с, поверхности гидрофобные ( $\theta>90$ градусов). Максимальный угол контакта для диапазона скоростей - $\theta \sim 113$ градуса. После покрытия силаном, статический контактный угол лежал в диапазоне 150 градусов.  |
|      |                                  | 3 мкл                 |   |
| [12] | Нержавеющая сталь (AISI 316L)    | вода                  | Сделаны выводы о том, что структура может быть использована для изменения цвета поверхности, из-за дифракции белого цвета. Измерены контактные углы: на не текстурированном образце ( $R_a \approx 69$ нм), угол контакта 75 градусов. При нанесении «мелкой ряби» (шероховатость $R_a \approx 75$ нм), контактный угол уменьшился до 55 - шероховатость увеличивает гидрофильную природу поверхности. В случае нанесения на поверхность «грубой ряби», капля полностью поглощается структурой, угол контакта измерить не удалось. Нетекстурированная поверхность имеет угол 92°. |
|      |                                  | 5 мкл                 |   |
| [13] | Алюминиевые листы                | Вода                  | Поверхности, обработанные импульсным волоконным лазером мощностью 20 Вт, получили супергидрофобные свойства. Контактный угол 160°. Гидрофобные поверхности, с контактными углами до 134 ° получены при помощи DPSS (твердотельного лазера с диодной накачкой), работающего на средней мощности до 220 Вт.   |
| [14] | Медь, латунь                     | деионизированная вода | Плотность энергии для медных образцов 75, 84, 93 Дж / см <sup>2</sup> , для латуни 55, 65, 75 Дж / см <sup>2</sup> , соответственно. После изготовления, поверхности становятся гидрофильными. С течением первых десяти дней контактный угол увеличивается,   |

|      |                            |                       |   |
|------|----------------------------|-----------------------|---|
|      |                            | 5 мкл                 | <p>далее его рост замедляется. На латуни, спустя 11 дней краевой угол достигает стабильного состояния. На меди стационарное состояние достигается спустя 30 дней. Контактный угол 152 градуса.</p> <p>Изменение смачиваемости текстурированных поверхностей изменяется под воздействием окружающей среды и объясняется раскислением поверхности металлов.</p>   |
| [15] | Сплав Ti-6Al-4V            | Дистиллированная вода | <p>Получены три типа микроструктур. Первоначально, облученные образцы показали гидрофильные свойства, однако, с течением времени, эти поверхности стали гидрофобными с углом контакта выше 90 градусов. Максимальный контактный угол может достигать 137 градусов. Посредством анализа поверхности, установлено что с течением времени поверхность металла меняет химический состав, повышается содержание углерода.</p>  |
|      |                            | 3 мкл                 |   |
| [16] | Графеновые пленки          |                       | <p>Наносили микроструктуру в виде бутона розы. Контактный угол необработанной поверхности 78°, после нанесения микроструктуры 150°.</p> <p>Исследован химический состав поверхности. Результаты показали, что количество кислородных групп уменьшается при лазерной абляции. Также содержание кислорода уменьшается с увеличением плотности цветка. Дальнейшее удаление гидрофильных групп кислорода лазерной абляцией может привести к увеличению гидрофобности.</p> |
| [17] | Нержавеющая сталь(304S 15) | Суспензия полистирола | <p>Мощность лазера и структура оказывают непосредственное воздействие на свойства текстурированных поверхностей.</p> <p>При увеличении мощности лазера, угол контакта возрастает до максимального значения и затем пропорционально уменьшается.</p> <p>Углы измерены через 7, 11 и 15 дней после нанесения микроструктуры. Установлено, что величина контактного угла увеличивается с течением времени.</p>   |

|      |       |       |   |
|------|-------|-------|---|
| [18] | Титан | Вода  | <p>Нанесены микроструктуры: линии, сетка и точечный узор. Промежутки между линиями или пятнами составили 50, 60, 70, 80, 90 и 100 мкм, соответственно.</p> <p>Получены значения статических контактных углов. До нанесения текстуры 77,8°.</p>                        |
|      |       | 3 мкл | <p>После лазерной обработки, менее 20°.</p> <p>С течением времени свойства поверхности изменились. Контактные углы достигли значения более 100°, максимальный угол около 150°.</p> <p>Явление, объясняется химической реакции между материалом окружающей средой.</p> |

## 2 Физическое моделирование процессов

### 2.1 Планирование экспериментальных исследований

Организация и планирование экспериментальных исследований являются важной частью деятельности научных работников, инженеров технологов. Теория планирование эксперимента формулирует приемы и способы оптимальной организации экспериментирования при исследованиях объектов самой разной физической формы[34].

#### 2.1.1 Основные размерные параметры воздействия и выходные переменные планируемого эксперимента

В работе выделены пять входных факторов: материал подложек, шероховатость, объём, жидкость, объемная концентрация.

Для описания поведения капель жидкости на поверхности обозначены выходные переменные эксперимента: статический контактный угол, объем.

Температура окружающей среды, скорость перемещения воздушных масс, тепловыделение от приборов и людей, находящихся в помещении в эксперименте не учитывались, так как предполагалось, что они не менялись во время проведения опытов, а их влияние на результаты исключалось установкой прозрачного стеклянного бокса.

#### 2.1.2 Выбор схемы проведения экспериментальных исследований

Проведен активный эксперимент, т.к. в исследовании существуют параметры группы X (статический контактный угол, диаметр, объем, высота капли), которые меняются во времени как детерминированные.

Оператор вмешивается в процесс и выбирает в каждом опыте те значения входных факторов (материал, шероховатость поверхности, объем дозирования, жидкость, объемная концентрация), которые представляют наибольший интерес.

В ходе эксперимента устанавливалось несколько значений, т.е. уровней факторов: изменялся объем дозирования; выбрано несколько материалов

подложек, с различной шероховатостью. Исследованы все возможные сочетания уровней факторов, т.е. проведен полный многофакторный эксперимент.

### 2.1.3 Выбор области изменения основных факторов

На выходной параметр могут оказывать влияние неучтенные факторы, такие как вибрация поверхности, на которой расположена установка, циркуляция воздуха через отверстия в боксе, наличие статического электричества, перепад атмосферного давления, которые объединены совместно с ошибками измерения в фактор случайности. Поэтому на значения выходного параметра всегда накладывается случайные отклонения. Отсюда следует, что при постановке эксперимента диапазоны изменений входных факторов должны быть как можно больше, насколько допустимо это в исследуемом объекте.

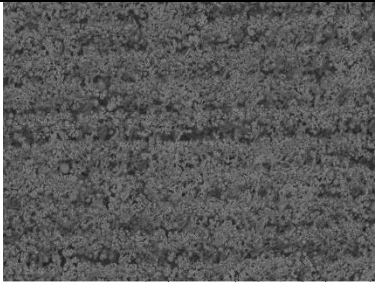
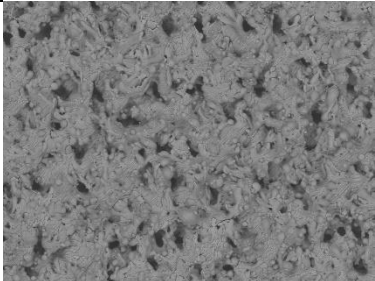
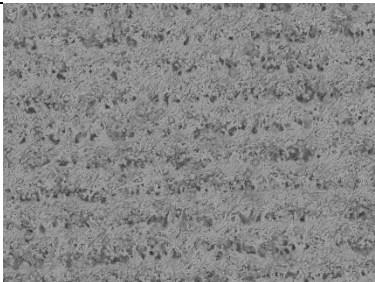
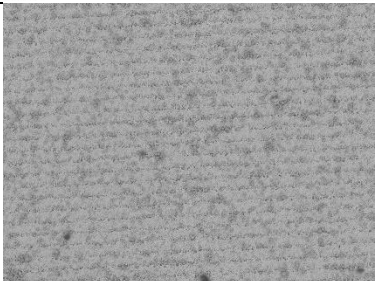

Выбор варьирования объёма капли лимитируется разрешающей способностью объектива камеры на установке, а также возможностью обработки капель специальной программой.

В качестве материала поверхностей выбраны медь, латунь, алюминий, нержавеющая сталь.

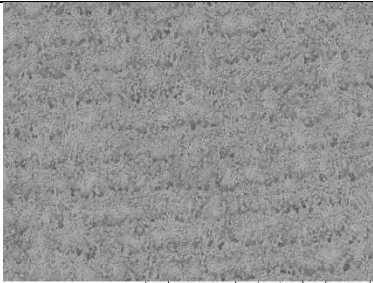
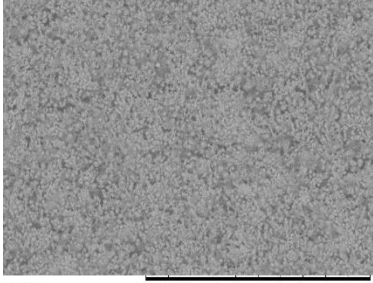
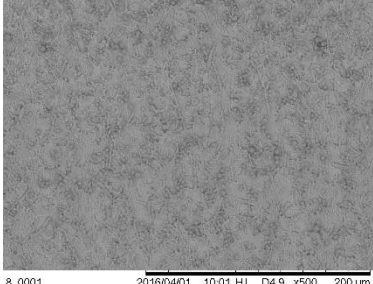
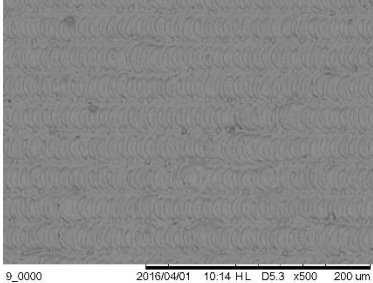
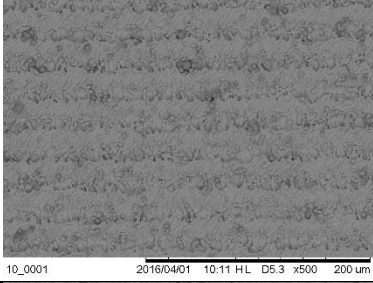
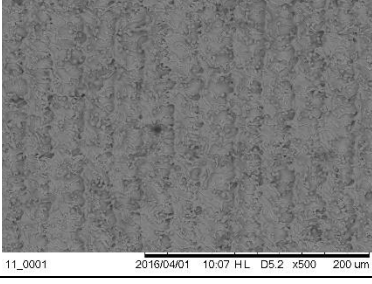
Лазерным излучением получены образцы с различным значением среднего арифметического отклонения профиля поверхности ( $R_a$ , мкм): 12 поверхностей из нержавеющей стали, 9 поверхностей из алюминия (таб. 2.1.). Из-за большого количества входных факторов эксперимента, латунь и медь обработке не подвергались. Для удобства дальнейшего описания каждому обработанному образцу присвоен номер. Поверхности без нанесенной микроструктуры присвоено нулевое значение.


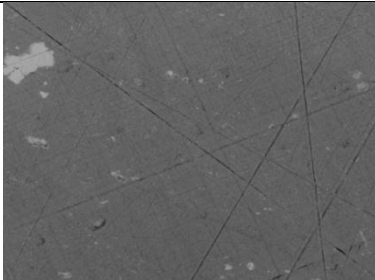
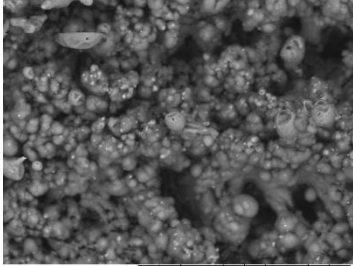
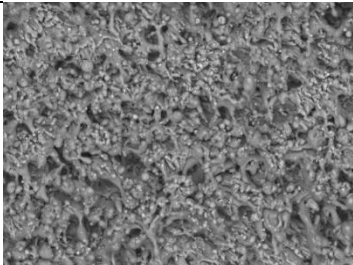
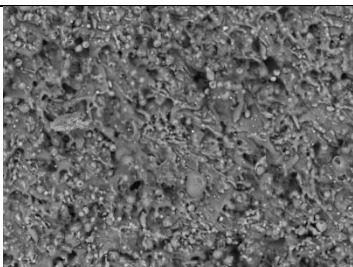
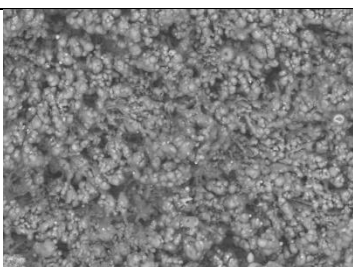
Микроструктура поверхностей исследована на микроскопе «Hitachi-3000M».

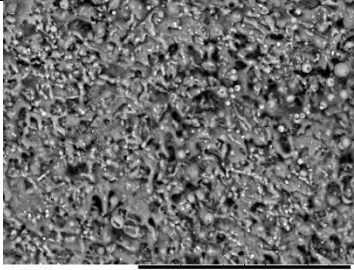
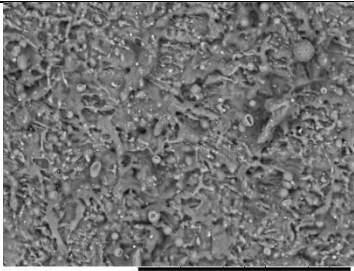
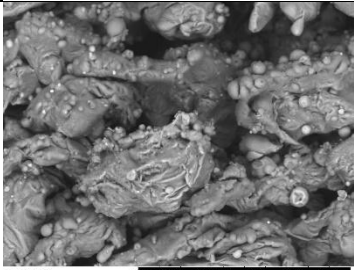
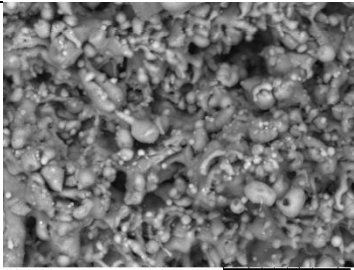
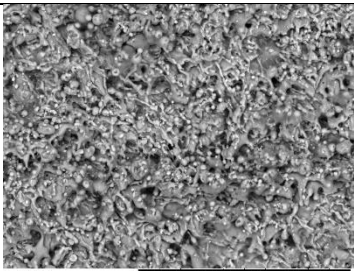
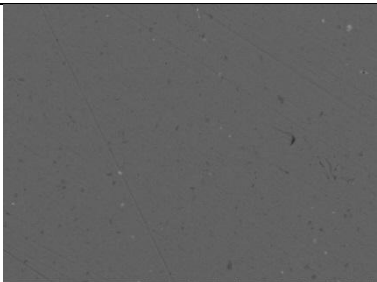
Таблица 2.1– Микроструктура поверхности

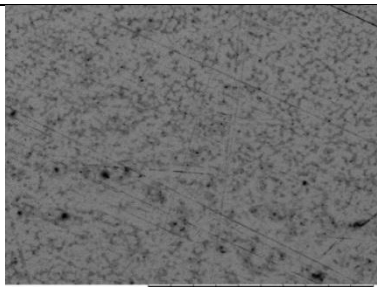
| Материал          | Ra    | № | Изображение поверхности   |
|-------------------|-------|---|---|
| Нержавеющая сталь | 1,79  | 1 |  <p>1_0001 2016/04/01 09:47 HL D4.4 x500 200 um</p>   |
|                   | 2,58  | 2 |  <p>2_0001 2016/04/01 09:44 HL D4.5 x500 200 um</p>   |
|                   | 1,29  | 3 |  <p>3_0001 2016/04/01 09:41 HL D4.4 x500 200 um</p>  |
|                   | 0,618 | 4 |  <p>4_0001 2016/04/01 09:38 HL D4.3 x200 500 um</p> |
|                   | 0,63  | 5 |  <p>5_0001 2016/04/01 09:52 HL D4.9 x500 200 um</p> |



|  |      |    |  |  |
|--|------|----|--|--|
|  | 1,29 | 6  |    |  |
|  | 1,23 | 7  |    |  |
|  | 0,84 | 8  |   |  |
|  | 0,78 | 9  |  |  |
|  | 0,99 | 10 |  |  |
|  | 1,29 | 11 |  |  |

|  |      |    |  |  |
|--|------|----|--|--|
|  | 0,84 | 12 |    |  |
| Алюминий<br>alim_alloy1 ГОСТ<br>21488-97(АМГ6) |      | 0  |    |  |
|  | 8,23 | 1  |   |  |
|  | 2,69 | 2  |  |  |
|  | 1,63 | 3  |  |  |
|  | 4,21 | 4  |  |  |

|                 |       |   |  |  |
|-----------------|-------|---|--|--|
|                 | 1,49  | 5 |    |  |
|                 | 1,21  | 6 |    |  |
|                 | 10,30 | 7 |   |  |
|                 | 3,71  | 8 |  |  |
|                 | 1,81  | 9 |  |  |
| Латунь<br>(Л59) | 0,024 | 0 |  |  |

|              |       |   |  |
|--------------|-------|---|--|
| Медь<br>(М1) | 0,032 | 0 |  |
|--------------|-------|---|--|

В работе проведен полный факторный эксперимент. Имеются пять входных факторов, которые варьируются на разных уровнях (таб. 2.2).

Таблица 2.2– Варьируемые факторы

|                       |     |                        |  |                 |              |
|-----------------------|-----|------------------------|--|-----------------|--------------|
| Материал              | -   | Нержавеющая сталь      | Алюминий<br>alim_alloy1<br>гост 21488-97(АМГ6) | Латунь<br>(Л59) | Медь<br>(М1) |
| Объем                 | мкл | 10, 20, 30, 40, 50, 60 |  |                 |              |
| Жидкость              | -   | Спирт                  |  | Вода            |              |
| Объемная концентрация | %   | 20                     | 40   | 60              | -            |

## 2.2 Описание экспериментальной установки

Для изучения процессов смачивания и растекания жидкостей на микроструктурированных поверхностях разработан экспериментальный стенд.

### 2.2.1 Устройство и принцип действия установки

Принципиальная схема и фотография установки, на которой проводились эксперименты, представлена на рисунке 1.

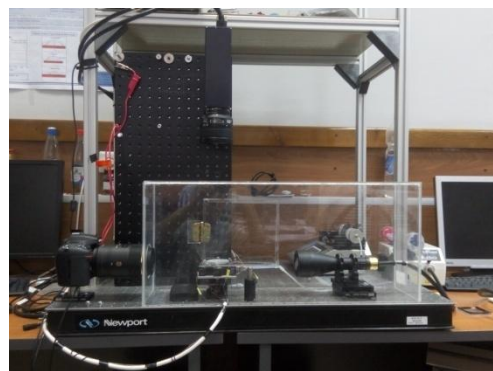
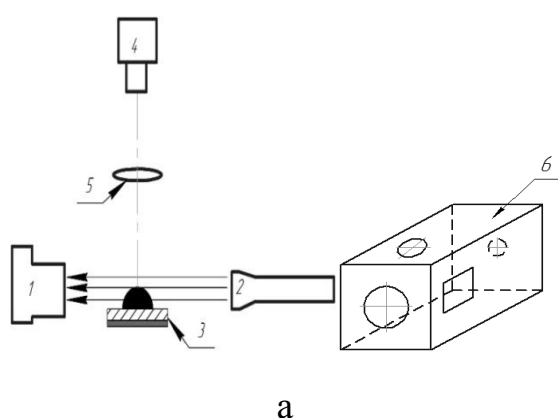


Рисунок 2.1 – Принципиальная схема (а) и фотография экспериментальной установки (б).

Основные элементы установки: фотоаппарат Nikon D7100 с объективом «Sigma AF 105mm f/2.8 EX DG OS HSM MacroNikon F» 1; источник плоскопараллельного света 2; рабочий участок 3, состоящий из гониометра, который служит для выравнивания поверхности относительно горизонтали в двух плоскостях и подложки; высокоскоростная камера Fastvideo-500M с объективом «Nikon 85mm f/1.4D AF Nikkor», со скоростью съемки до 500 кадров в секунду с разрешением 1280 x 1024 пикселей 4; конденсирующая линза 5, используемая для проецирования изображения на сенсор видеокамеры; прозрачный бокс 6.

Установка включает в себя оптическую теньевую систему.

На рабочий участок 3 с помощью болтового соединения и металлических уголков устанавливается подложка, представляющая собой круглую металлическую пластину диаметром 56 мм и толщиной 4 мм.

Поток плоскопараллельного света проходит через каплю, лежащую на подложке, и регистрируется объективом фотоаппарата 1. Камера 4 осуществляет видеосъемку сверху. Это позволяет зафиксировать форму капли.

Для уменьшения влияния внешних факторов (изменение температуры в помещении, перемещение воздушных масс) установлен бокс 6, выполненный из листов прозрачного органического стекла.

Верхнее отверстие предназначено для съемки видеокамерой 4. Боковое отверстие необходимо для установки объектива фотоаппарата 1. Для

формирования капли жидкости на поверхности подложки предусмотрена дверца.

Микроструктура нанесена лазерной системой «МинниМаркер 2 M20» компании «Лазерный Центр» (Россия). Технические характеристики оборудования представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3. Технические характеристики лазерной системы «МинниМаркер 2»

|  |                                   |
|--|-----------------------------------|
| Тип лазера                             | иттербиевый импульсный волоконный |
| Длина волны лазерного излучения        | 1,06 мкм                          |
| Выходная мощность лазера               | 20 Вт                             |
| Максимальная энергия в импульсе лазера | 1,0 мДж                           |
| Частота следования импульсов           | от 20 кГц до 100 кГц              |
| Ресурс лазера                          | более 30 000 час                  |

2.2.2 Способы и средства регистрации, методы и точность измерения основных параметров.

В работе капля формируется при помощи пипеточного одноканального электронного дозатора ленпипет ЗАО «Термо Фишер Сайентифик» (Россия).

Дозатор проверен на фирме изготовителе, на максимальном и минимальном объеме (таб. 2.4). По результату проверки, систематическая составляющая основной относительной погрешности дозатора и среднеквадратичное отклонение случайной составляющей основной погрешности укладываются в допустимые пределы.

Таблица 2.4. Результат проверки дозатора

| Номинальное значение объема дозы | Среднее арифметическое значение объема дозы | Систематическая составляющая основной относительной погрешности дозатора | Предел допускаемой систематической составляющей основной относительной погрешности дозатора | Среднеквадратичное отклонение случайной составляющей основной погрешности | Предел допускаемого среднеквадратичного отклонения случайной составляющей основной погрешности |
|----------------------------------|---|--|---|---|--|
| мкл                              | Мкл   | %  | %   | %   | %  |
| 10                               | 10,03                                       | 0,28   | 2,5   | 1,38  | 3,0  |
| 100                              | 100,68                                      | 0,68   | 1,5   | 0,13  | 2,0  |

Подложки исследованы на приборе для измерений параметров шероховатости HOMMELTESTERT1000, фирмы HommelwerkeGmbH(Германия). Его работа основана на принципе ощупывания неровностей исследуемой поверхности алмазной иглой и преобразования возникающих при этом механических колебаний в изменения напряжения, которые усиливаются и преобразуются электронным блоком.

Прибор имеет предел систематической составляющей основной относительной погрешности по параметру  $Ra=3\%$  (среднее арифметическое из абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины).

### 2.2.3 Методика проведения исследования

Проведение исследования состоит из двух этапов: проведение эксперимента и обработка данных.

Порядок проведения экспериментов:

Подложка очищается от загрязнений этиловым спиртом и дистиллированной водой. Закрепляется на рабочий участок при помощи двух металлических уголков и болтов.

В исследуемую область помещается линейка (рис.2.2). При помощи перемещения оправы объектива настраивается фокусное расстояние фотоаппарата.



Рисунок 2.2 – Настройка фокусного расстояния фотоаппарата

Для определения масштаба на рабочий участок помещается предмет с известными размерами (рис. 2.3). В работе используется болт стандартного диаметра 9,4 мм. На первом снимке проверяется правильность настройки оборудования: интенсивность света, четкость изображения, контактная линия.



Рисунок 2.3 – Снимок болта



В настройках фотоаппарата задается скорость съемки: 1 кадр в секунду. Для этого, устанавливаем следующие параметры (табл. 2.5).

Таблица 2.5. Настройка фотоаппарата

|                             |                                  |
|-----------------------------|----------------------------------|
| Светочувствительность ISO   | 160                              |
| Диафрагма                   | F 6.3                            |
| Выдержка синхронизации      | 1/250 с                          |
| Диск режима съемки          | CL (непрерывный низкоскоростной) |
| Диск выбора режимов         | M (ручной режим)                 |
| Скорость съемки в режиме CL | 1 кадр/с                         |

После нажатия кнопки MENU, на дисплее откроется информационное окно. В закладке «недавние настройки», открываем «съемка с интервалом». Выбираем время запуска – «сейчас», интервал устанавливаем 1 миллисекунду. Во вкладке «выб. кол.раз × кол. сним.» оставляем заданное количество – 999 кадров. Нажимаем запуск.

Дозатором ленпипет капля жидкости помещается на подложку.

Для начала работы с прибором, необходимо нажать операционную кнопку. При помощи клавиш прокрутки выбрать нужный объем жидкости.

При выдавливании капель малых объемов используется обратное дозирование. Для этого в меню необходимо выбрать функцию «Обратн. дозир.».

Нажатием правой клавиши выбора, установить скорость забора жидкости 9 мкл/с и выбрать скорость выдавливания капли 9 мкл/с.

Серия экспериментов повторяется пять раз для выявления погрешностей измерений.

Обработка данных:

Полученные данные обрабатываются в программе DropShapeAnalysis, разработанной компанией KRUSS. Для этого, из одной серии, выбирается

фотография, на которой изображен момент, когда капля перестает растекаться. В программе XnView изображение форматируется.

Левой кнопкой мыши выделяется нужный фрагмент, на главной панели выбирается значек «обрезать». Далее во вкладке «изображение» необходимо выбрать «преобразовать в 256 оттенков серого». И сохранить в формате «.bmp».(рис. 2.4).

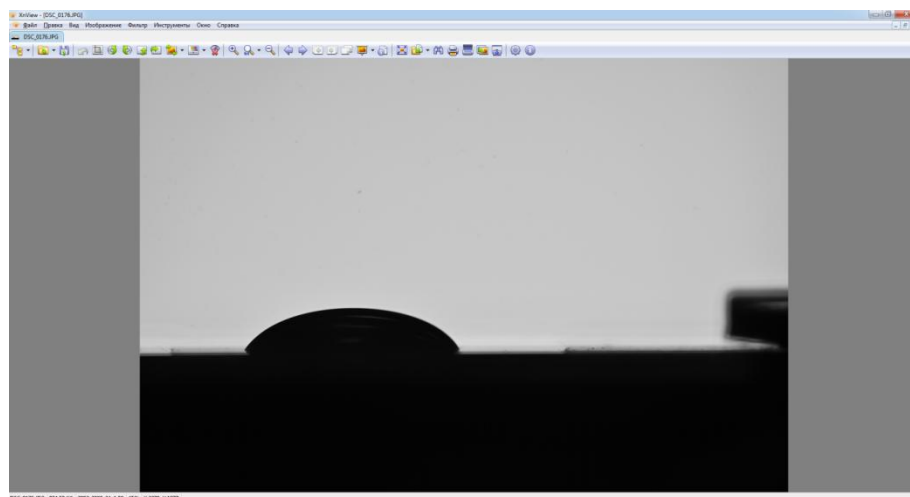
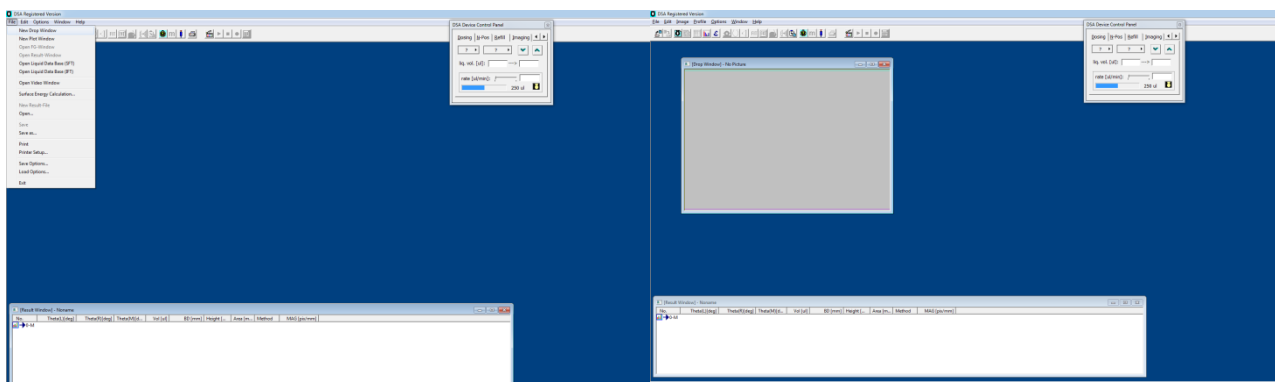


Рисунок 2.4 – Интерфейс программы XnView

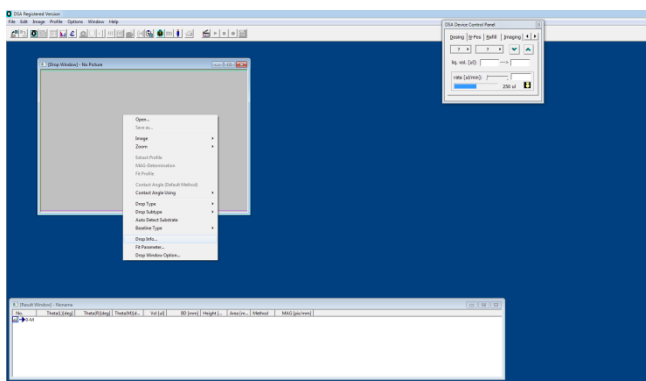
В программе DropShapeAnalysis необходимо открыть диалоговое окно, для этого на главной панели выбирается «file» (а), затем «newdropwindow». Откроется рабочее поле (б). Далее, необходимо нажать на рабочее поле правой кнопкой мыши и из появившегося диалогового окна выбрать вкладку «dropinfo» (в). В область «MagnificationFactor (MAG)» занести масштаб съемки (г). Для выбора изображения нажать на рабочее поле правой кнопкой мыши «open» (д). Установить базовую линию на границу раздела твердое тело-жидкость (е).

Для измерения контактного угла и объема капли, необходимо нажать правой кнопкой мыши на изображение и из появившегося диалогового окна выбрать «Contactangleusing» (ж)(рис. 2.5).

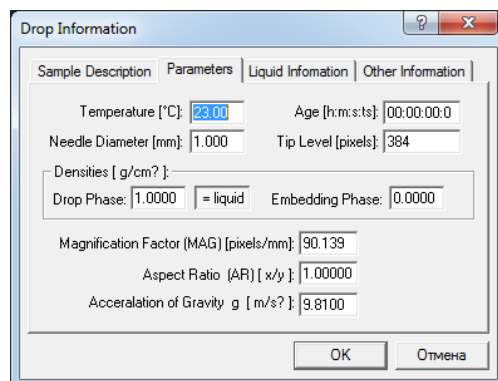


а

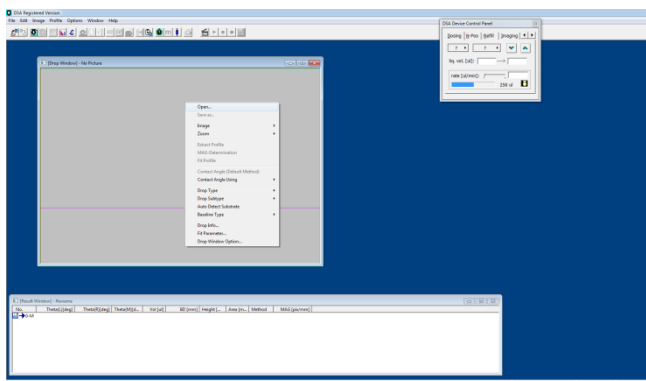
б



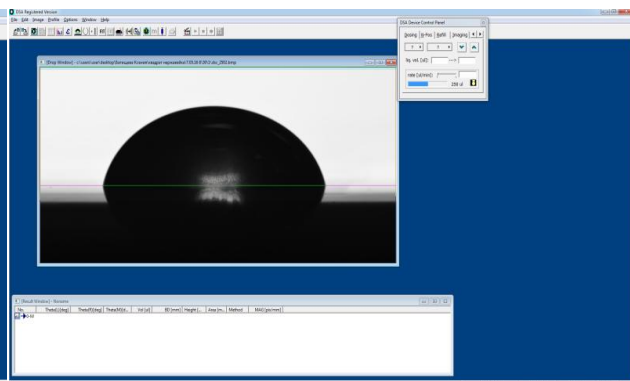
в



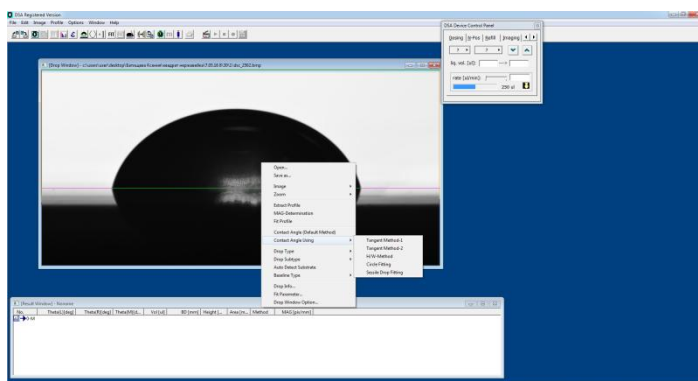
г



д



е



ж

Рисунок 2.5 – Последовательность работы в программе DropShapeAnalysis

Геометрические параметры капли определялись методами: метод Юнга-Лапласа (L-Y), тангенциальный метод 1 (T-1), тангенциальный метод 2 (T-2), метод круга (CIR), метод длины-ширины (HW).

В работе был использован метод Юнга – Лапласа (метод лежащей капли) и тангенциальный метод 1 (T-1).

По результатам обработки данных строятся графические зависимости статического контактного угла от объема капли.

### 2.3 Выводы по второй главе

В работе выбран активный полный факторный эксперимент.

Выделены пять входных факторов: материал подложек, шероховатость, объём, жидкость, объемная концентрация и выходные параметры: статический контактный угол, объем.

Разработана методика проведения исследования. Она разделена на два этапа: проведение эксперимента и обработка данных.

Целью выполнения данного раздела - экономическое обоснование научно-исследовательской работы. Оценка является комплексной и произведена в разрезе экономической эффективности, социальной значимости и других аспектов, т.к. проведение экспериментальных исследований растекания капель воды на структурированных поверхностях металлов требует привлечения финансовых затрат и других ресурсов, которые должны быть экономически оправданы и целесообразны.

#### 4.1. Экспертная оценка

Выбор метода оценки формы капли влияет на точность анализа статического краевого угла. Как было сказано во второй главе, в программе DropShapeAnalysis существует пять методов оценки параметров лежащей капли (статический краевой угол, объем, диаметр, высоту): метод Юнга-Лапласа (L-Y), тангенциальный метод 1 (T-1), тангенциальный метод 2 (T-2), метод круга (CIR), метод длины-ширины (HW).

Проведение экспертной оценки позволило определить наиболее точный метод обработки данных, в условиях нашего экспериментального исследования.

Экспертная оценка проводилась по следующим параметрам:

1. Простота;
2. Точность;
3. Наглядность;
4. Отсутствие влияния внешних факторов;
5. Адаптированность к установлению зависимостей.

Три эксперта оценили параметры методов по 10-бальной шкале (10 - max) “ $V_i$ ”, а также важность параметра по 5-бальной шкале (5 - max) “ $P_i$ ”.

Для каждого метода определяем весовой коэффициент  $W_i$ , определяемый отношением  $P_i / \sum P_i$ , и оценку эффективности  $V_i * W_i$ .

Расчёт считается верным, если суммарный весовой коэффициент равен единице. Таким образом, весовой коэффициент  $W_i$  показывает долю важности каждого из параметров.

Таблица 4.1 – Оценка эффективности методов первым экспертом

| Название метода        | Простота | Точность | Наглядность | Отсутствие влияния внешних факторов | Адаптированность к установлению зависимостей | Сумма |
|------------------------|----------|----------|-------------|-------------------------------------|--|-------|
| Метод Юнга-Лапласа     | 7/1,27   | 10/2,27  | 8/1,45      | 6/1,36                              | 6/1,09                                       | 7,45  |
| Метод длины-ширины     | 6/1,09   | 5/1,14   | 10/1,82     | 4/0,91                              | 4/0,73                                       | 5,68  |
| Метод круга            | 7/1,27   | 7/1,59   | 10/1,82     | 5/1,14                              | 6/1,09                                       | 6,91  |
| Тангенциальный метод 1 | 8/1,45   | 8/1,82   | 8/1,45      | 6/1,36                              | 8/1,45                                       | 7,54  |
| Тангенциальный метод 2 | 3/0,54   | 8/1,82   | 8/1,45      | 3/0,68                              | 9/1,64                                       | 6,14  |
| Важность (bi) [1-5]    | 4        | 5        | 4           | 5                                   | 4  | 22    |
| Вес (Wi)               | 0,18     | 0,23     | 0,18        | 0,23                                | 0,18   | –     |

Таблица 4.2– Оценка эффективности методов вторым экспертом

| Название метода        | Простота | Точность | Наглядность | Отсутствие влияния внешних факторов | Адаптированность к установлению зависимостей | Сумма |
|------------------------|----------|----------|-------------|-------------------------------------|--|-------|
| Метод Юнга-Лапласа     | 9/1,63   | 10/2,27  | 9/1,63      | 6/1,36                              | 7/1,27                                       | 8,18  |
| Метод длины-ширины     | 5/0,91   | 6/1,36   | 8/1,45      | 3/0,68                              | 5/0,91                                       | 5,32  |
| Метод круга            | 8/1,45   | 6/1,36   | 10/1,82     | 6/1,36                              | 4/1,73                                       | 6,72  |
| Тангенциальный метод 1 | 8/1,45   | 9/2,04   | 10/1,82     | 6/1,36                              | 7/1,27                                       | 7,95  |
| Тангенциальный метод 2 | 4/0,72   | 7/1,59   | 9/1,64      | 4/0,91                              | 8/1,45                                       | 6,32  |
| Важность (bi) [1-5]    | 4        | 5        | 4           | 5                                   | 4  | 22    |
| Вес (Wi)               | 0,18     | 0,23     | 0,18        | 0,23                                | 0,18   | –     |

Таблица 4.3 – Оценка эффективности методов третьим экспертом

| Название метода        | Простота | Точность | Наглядность | Отсутствие влияния внешних факторов | Адаптированность к установлению зависимостей | сумма |
|------------------------|----------|----------|-------------|-------------------------------------|--|-------|
| Метод Юнга-Лапласа     | 4/0,72   | 9/2,04   | 8/1,45      | 5/1,14                              | 7/1,27                                       | 6,63  |
| Метод длины-ширины     | 9/1,64   | 2/0,45   | 9/1,63      | 2/0,45                              | 2/0,36                                       | 4,54  |
| Метод круга            | 7/1,27   | 5/1,14   | 7/1,27      | 6/1,36                              | 7/1,27                                       | 6,32  |
| Тангенциальный метод 1 | 7/1,27   | 7/1,59   | 8/1,45      | 7/1,59                              | 7/1,27                                       | 7,18  |
| Тангенциальный метод 2 | 2/0,36   | 9/2,04   | 8/1,45      | 2/0,45                              | 9/1,64                                       | 5,95  |
| Важность (bi) [1-5]    | 4        | 5        | 4           | 5                                   | 4  | 22    |
| Вес (Wi)               | 0,18     | 0,23     | 0,18        | 0,23                                | 0,18   | –     |

В таблице 4.4 представлены итоговые экспертные оценки.

Таблица 4.4– Итоговые экспертные оценки

| Название метода        | Первый эксперт | Второй эксперт | Третий эксперт | Средняя оценка |
|------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Метод Юнга-Лапласа     | 7,45           | 8,18           | 6,63           | 7,42           |
| Метод длины-ширины     | 5,68           | 5,32           | 4,54           | 5,18           |
| Метод круга            | 6,91           | 6,72           | 6,32           | 6,65           |
| Тангенциальный метод 1 | 7,54           | 7,95           | 7,18           | 7,56           |
| Тангенциальный метод 2 | 6,14           | 6,32           | 5,95           | 6,14           |

Результаты трех независимых экспертных оценок показали, что для экспериментальных исследований поведения капли наиболее точный – тангенциальный метод 1. Для большей точности измерения статического краевого угла, были выбраны два метода оценки: тангенциальный 1 и метод Юнга-Лапласа. После проведения серии экспериментов по результатам, полученным двумя методами были построены зависимости и проведена оценка погрешностей измерений.

## 4.2 Календарный план

Планирование экспериментального исследования осуществляется в последовательности:

1. определяется структура работ в рамках научного исследования;
2. определяются участники каждой работы;
3. устанавливается продолжительность планируемых работ;
4. строится график проведения научных исследований.

Список работ и участников экспериментального исследования сведен в таблицу 4.5.



Таблица 4.5– Перечень работ и задействованных участников

| № раб | Содержание работ  | Должность исполнителя |
|-------|---|-----------------------|
| 1     | Составление технического задания  | Руководитель          |
| 2     | Выбор темы и направления проведения эксперимента  | Руководитель, студент |
| 3     | Проведения обзора литературы, теоретическая проработка проблемы   | Студент               |
| 4     | Составление методики проведения эксперимента и выбор метода обработки данных. Постановка целей и задач исследования | Руководитель, студент |
| 5     | Закупка необходимого (недостающего) оборудования, инструментов, дополнительных деталей, жидкостей                   | Руководитель, студент |
| 6     | Установка, подключение, настройка оборудования  | Руководитель, студент |
| 7     | Проведение предварительного эксперимента  | Студент               |
| 8     | Обработка результатов предварительного эксперимента   | Студент               |
| 9     | Корректирование работы оборудования, методики проведения эксперимента   | Руководитель, студент |
| 10    | Проведение эксперимента   | Студент               |
| 11    | Обработка результатов   | Студент               |
| 12    | Обобщение и оценка результатов исследований, написание выводов  | Руководитель, студент |
| 13    | Оформление проделанной работы, составление пояснительной записки  | Студент               |
| 14    | Проверка проекта  | Руководитель          |

Построим ленточный график проведения научных работ в форме диаграммы Ганта. Для этого, длительность каждого этапа работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. 2016 году было 365 календарных дней. При пятидневной рабочей неделе с двумя выходными днями будет 247 рабочих дней, в том числе 5 сокращенных на один час предпраздничных рабочих дней, и 118 выходных и нерабочих праздничных дней.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}},$$

где  $T_{\text{кал}}$  – количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}}$  – количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}}$  – количество праздничных дней в году.

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{365 - 118} = 1,4777.$$

Продолжительность выполнения  $i$ -ой работы в календарных днях:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}},$$

где  $T_{pi}$  - продолжительность выполнения  $i$ -й работы в рабочих днях.

Рассчитанные значения в календарных днях округляем до целого числа.

Результаты расчетов сведем в таблицу 4.6.

Таблица 4.6 – Продолжительность работ

| № раб | Содержание работ   | $T_{pi}$ | $T_{ki}$ | Начало | Конец |
|-------|--|----------|----------|--------|-------|
| 1     | Составление ТЗ   | 1        | 2        | 0      | 2     |
| 2     | Выбор темы и направления проведения эксперимента   | 2        | 3        | 2      | 5     |
| 3     | Теоретическая проработка проблемы  | 14       | 21       | 5      | 26    |
| 4     | Составление плана проведения эксперимента и выбор метода обработки данных. Постановка целей и задач исследования | 1        | 2        | 26     | 28    |
| 5     | Закупка необходимого (недостающего) оборудования, инструментов, дополнительных деталей, жидкости                 | 1        | 2        | 28     | 30    |
| 6     | Установка и подключение оборудования   | 1        | 2        | 30     | 32    |
| 7     | Проведение предварительного эксперимента   | 10       | 15       | 32     | 47    |
| 8     | Обработка результатов предварительного эксперимента  | 3        | 5        | 47     | 52    |
| 9     | Корректирование работы оборудования и методики проведения эксперимента   | 1        | 2        | 52     | 54    |

|    |  |    |    |     |     |
|----|--|----|----|-----|-----|
| 10 | Проведение эксперимента  | 31 | 46 | 54  | 100 |
| 11 | Обработка результатов  | 7  | 11 | 100 | 111 |
| 12 | Обобщение и оценка результатов исследований, написание выводов   | 2  | 3  | 111 | 114 |
| 13 | Оформление проделанной работы, составление пояснительной записки | 4  | 6  | 114 | 120 |
| 14 | Проверка проекта   | 1  | 2  | 120 | 122 |

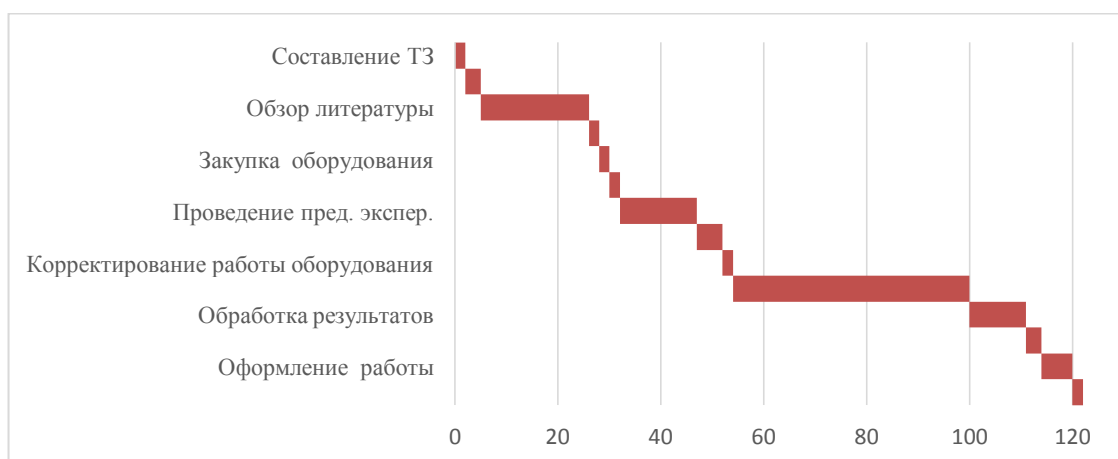


Рисунок 4.1 – График Ганта

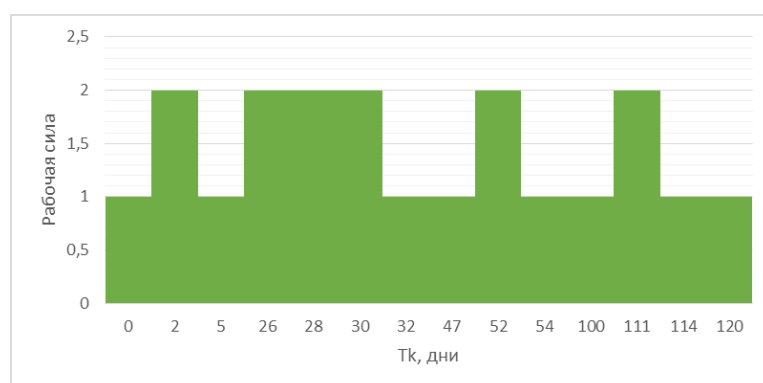


Рисунок 4.2 – Диаграмма использования рабочей силы

### 4.3 Бюджет проекта

Для обеспечения полного и достоверного отражения всех видов расходов, связанных с выполнением проекта, составляется смета.

В процессе формирования сметы проекта используются следующие статьи затрат:

- материальные затраты проекта;
- полная заработная плата руководителя проекта;
- амортизация.

Материальные затраты на проектные работы включают стоимость всех материалов, используемых при разработке проекта:

- затраты на электроэнергию;
- приобретаемые со стороны материалы, необходимые для создания экспериментального стенда;
- оборудование для проведения эксперимента;
- продукции для обеспечения нормального технологического процесса или расходуемых на другие производственные и хозяйственные нужды (проведение испытаний, контроль, содержание, ремонт и эксплуатация оборудования);
- материалы, используемые в качестве объектов исследований;
- канцелярские принадлежности, ручки, бумага, картриджи и т.п.

Стоимость каждого материала определяется по формуле:

$$C = K \cdot Ц,$$

где  $K$  – количество (объем потребления), шт.;

$Ц$  – стоимость единицы материала, руб.

В таблице 4.7 приведены материальные затраты проекта.

| Статьи расходов   | Единица измерения | Цена, руб | Объем потребления | Итого, руб. |
|---|-------------------|-----------|-------------------|-------------|
| Фотоаппарат <u>NikonD7100</u>                                   | Шт.               | 39000     | 1                 | 39000       |
| Объектив Sigma  | Шт.               | 22000     | 1                 | 22000       |
| Батарейный блок «MB-D15 для Nikon D7100» для непрерывной съемки | Шт.               | 5200      | 1                 | 5200        |
| Беспроводная погодная станция In/OutDoor                        | Шт.               | 1848      | 1                 | 1848        |

|   |       |      |       |          |
|---|-------|------|-------|----------|
| Изоляционная лента «Safeline MULTECH 911 PRO» | Шт.   | 48   | 1     | 48       |
| Клей Герметик МОМЕНТ силикон                  | Шт.   | 117  | 1     | 117      |
| Канц. товары                                  |       |      |       |          |
| • Ручки, карандаши, штрих и т.д.              | —     | —    | —     | 250      |
| • Бумага;                                     | Пачка | 150  | 1     | 150      |
| • Флеш карта;                                 | шт.   | 250  | 1     | 250      |
| • Дополнительные расходы                      | —     | —    | —     | 350      |
| Заправка картриджей                           | Шт.   | 150  | 1     | 150      |
| Электроэнергия                                | КВт·ч | 4,25 | 162,1 | 688,93   |
| ИТОГО:  |       |      |       | 70891.93 |

Таблица 4.7– Материальные затраты проекта

В затраты на электроэнергию входит потребление света и использование различного оборудования в течении проекта.

Расходы на электроэнергию представлена в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Электропотребление

| Источники потребления                      | Мощность потребления<br>, КВт | Кол-во часов<br>работы, ч | Расход,<br>КВт·ч |
|--|-------------------------------|---------------------------|------------------|
| Компьютер                                  | 0,5                           | 144                       | 72               |
| Освещение                                  | 0,07                          | 90                        | 6,3              |
| Фотоаппарат                                | 0,1                           | 60                        | 6                |
| Видеокамера                                | 0,25                          | 60                        | 15               |
| Комплекс осветительного оборудования       | 0,23                          | 60                        | 13,8             |
| Термопары                                  | 0,1                           | 40                        | 4                |
| Линейный источник питания постоянного тока | 1                             | 40                        | 40               |
| Насос                                      | 0,5                           | 10                        | 5                |
| Итого, КВт*ч                               |                               | 162,1                     |                  |

Амортизация - перенесение по частям стоимости основных средств и нематериальных активов по мере их физического или морального износа на стоимость производимой продукции (работ, услуг).

Таблица 4.9 – Амортизация

| Объекты                                    | Норма амортизации | Первич. стоимость | Величина амортизации в год | Кол-во часов работы в год | Амортизация в час | Кол-во часов работы | $C_{\text{Аморт}}$ |
|--|-------------------|-------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------|---------------------|--------------------|
| Компьютер                                  | 20                | 40000             | 8000                       | 1720                      | 4,651163          | 144                 | 669,77             |
| Принтер                                    | 20                | 5100              | 1020                       | 10                        | 102               | 1                   | 102                |
| Фотоаппарат                                | 20                | 39000             | 7800                       | 675                       | 11,55556          | 60                  | 693,33             |
| Видеокамера                                | 20                | 300000            | 60000                      | 675                       | 88,88889          | 60                  | 5333,33            |
| Комплекс осветительного оборудования       | 20                | 12154,48          | 2430,896                   | 675                       | 3,601327          | 60                  | 216,08             |
| Термопары                                  | 20                | 30473             | 6094,6                     | 338                       | 18,03136          | 60                  | 1081,882           |
| Линейный источник питания постоянного тока | 20                | 19655             | 3931                       | 338                       | 11,63018          | 40                  | 465,21             |
| Насос                                      | 20                | 58900             | 11780                      | 169                       | 69,70414          | 10                  | 697,04             |
| Объектив Sigma                             | 20                | 22000             | 4400                       | 675                       | 6,518519          | 60                  | 391,11             |
| Объектив Nicon                             | 20                | 65000             | 13000                      | 675                       | 19,25926          | 60                  | 1155,56            |
| Итого                                      | 10805,31          |                   |                            |                           |                   |                     |                    |

Оплата работы руководителя ВКР (бакалавра) почасовая. Заработная плата руководителя выпускной квалификационной работы бакалавра определяется следующим образом.

В соответствии с временным положением о порядке нормирования труда научно-педагогического процесса тариф на почасовую оплату труда – 300 руб/час. Норма времени на руководство ВКР бакалавра 22 часа.

Расходы на оплату труда:

$$C_{\text{з.пл.}} = 22 * 300 = 6600 \text{ руб.}$$

Расходы на социальные нужды:

$$C_{\text{с.н.}} = 0,3 * 6600 = 1980 \text{ руб.}$$

Итого:

$$\sum C_3 = C_{\text{з.пл.}} + C_{\text{с.н.}} = 6600 + 1980 = 8580 \text{ руб.}$$

Полная стоимость проекта составит:

$$\sum C = \sum C_{\text{м.з}} + \sum C_3 + \sum C_A = 70891,93 + 8580 + 10805,31 = 90277,24 \text{ руб.}$$

#### 4.5 Ресурсоэффективность

Исследовательская работа может быть выполнена в трёх исполнениях:

- Исполнение 1 подразумевает покупку и использование фотокамеры D7100, для получения теневого изображения капли и фиксации контактного угла.

- Исполнение 2 включает в себя использование сверхскоростной видеокамеры Phantom Miro M/R/LC310, обладающей усовершенствованными параметрами и большей стоимостью чем фотокамера D7100.

- Исполнение 3 характеризуется тем, что установка (стенд) уже собран и докупать оборудование не надо.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по трем вариантам исполнения приведено в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Расчет бюджета затрат

| Наименование статьи                                    | Сумма, руб. |            |          |
|--|-------------|------------|----------|
|  | Исп.1       | Исп.2      | Исп.3    |
| Материальные затраты проекта                           | 90277,24    | 1363480,93 | 2003,93  |
| Затраты по основной заработной плате исполнителей темы | 8580        | 8580       | 8580     |
| Накладные расходы (16 % от суммы ст. 1-2)              | 15817,16    | 219529,75  | 1693,43  |
| Бюджет затрат проекта (Сумма ст. 1- 3)                 | 114674,4    | 1591590,68 | 12277,36 |

Интегральные показатели финансовой эффективности научного исследования:

$$I^{1\text{ исп}} = \frac{114674,4}{1591590,68} = 0,07 ; I^{2\text{ исп}} = \frac{1591590,68}{1591590,68} = 1;$$

$$I^{3\text{ исп}} = \frac{12277,36}{1591590,68} = 0,01.$$

Таблица 4.11 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

| Критерии \ Объект исследования               | Весовой коэффициент параметра | Исп.1 | Исп.2 | Исп.3 |
|--|-------------------------------|-------|-------|-------|
| 1. Скорость выполнения проекта               | 0,25                          | 5     | 5     | 1     |
| 2. Финансовая возможность выполнения проекта | 0,3                           | 4     | 1     | 5     |
| 3. Точность результатов                      | 0,25                          | 4     | 5     | 3     |
| 4. Энергосбережение                          | 0,05                          | 2     | 2     | 2     |
| 5. Надежность                                | 0,15                          | 5     | 5     | 5     |

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности:

$$I_{исп1}^p = 5 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,3 + 4 \cdot 0,25 + 2 \cdot 0,05 + 5 \cdot 0,15 = 4,3$$

$$I_{исп2}^p = 5 \cdot 0,25 + 1 \cdot 0,3 + 5 \cdot 0,25 + 2 \cdot 0,05 + 5 \cdot 0,15 = 3,65;$$

$$I_{исп3}^p = 1 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,3 + 3 \cdot 0,25 + 2 \cdot 0,08 + 5 \cdot 0,15 = 3,35.$$

Наиболее ресурсоэффективным оказалось исполнение 1.